

# **Otimização e aplicações de geradores termoelétricos alimentados através do calor corporal**

**João Pedro Milheiro Mora**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em

**Bioengenharia**

(2º ciclo de estudos ou mestrado integrado)

Orientadora: Maria do Rosário Alves Calado

**setembro de 2020**



# Agradecimentos

A realização desta dissertação só foi possível graças aos diversos apoios e incentivos com que pude contar ao longo da sua realização. Quero deste modo expressar a minha gratidão para com aqueles que contribuíram de alguma forma para o desenvolvimento deste trabalho.

Um especial agradecimento à Ex.<sup>a</sup> Professora Doutora Maria do Rosário Alves Calado, orientadora deste trabalho, pela disponibilidade que sempre demonstrou ter para me auxiliar, pelas sugestões, críticas, apoio e pelo esclarecimento de dúvidas que foram surgindo no decorrer da realização do trabalho. Um muito obrigado pela forma agradável e profissional com que sempre me abordou e pela partilha de conhecimentos e informações que tornaram a realização deste trabalho muito mais educativa.

Aos meus amigos que sempre contribuíram de alguma forma com o seu companheirismo, entusiasmo e pelo constante apoio e motivação que me transmitiram ao longo da realização desta dissertação, nunca me deixando desistir.

Aos meus pais e irmã, que sempre foram exemplos a seguir, pelo apoio incondicional, paciência, compreensão e amizade que sempre me proporcionaram.



# Resumo

Atualmente, os problemas ambientais são cada vez mais uma realidade preocupante e uma prioridade para as organizações ambientalistas e governamentais. Os excessivos consumos energéticos, os elevados custos associados e os problemas ambientais relacionados são as principais razões para se procurarem alternativas ao uso de pilhas e baterias para alimentação de dispositivos eletrônicos.

Perante este problema, procuram-se cada vez mais alternativas para alimentar dispositivos eletrônicos que proporcionem redução de custos, redução de consumo energético e redução dos efeitos nocivos para o ambiente. Neste contexto, o uso de energias renováveis tem sido uma forte aposta no combate aos problemas de nível ambiental e de consumo energético.

De entre as diversas formas de obter energia elétrica através de energias renováveis, o presente trabalho destaca o uso de geradores termoelétricos que utilizam o gradiente de temperatura entre o ambiente e o corpo para obtenção de energia elétrica.

Os geradores termoelétricos fazem uso da termoeletricidade, essencialmente do efeito de Seebeck e do efeito de Peltier para gerar energia através da diferença de temperatura que se consegue captar à superfície da pele.

A energia captada pelo gerador termoelétrico tem como finalidade alimentar dispositivos eletrônicos de pequenas dimensões tais como relógios de pulso, oxímetros de pulsos ou até pacemakers. Desta forma podemos substituir o uso de pilhas ou baterias por esses mesmos dispositivos.

O presente trabalho apresenta um estudo das possíveis aplicações de um gerador termoelétrico bem como o estudo dos fatores que influenciam o seu desempenho. Ainda, apresenta-se a otimização do gerador termoelétrico, tendo em conta os seus diferentes parâmetros e características, com o objetivo de obter uma maior potência.

## Palavras-chave

Gerador termoelétrico, termoeletricidade, efeito de Seebeck, efeito de Peltier, resistência térmica, condutividade térmica, Matlab.



# Abstract

Nowadays environmental problems are an increasingly worrying and a priority for environmental and governmental organizations. Excessive energy consumption, high associated costs and related environmental problems are the main reasons for looking for alternatives to the use of batteries in power electronic devices.

In view of this problem, more and more alternatives are being sought to power electronic devices that can present cost savings, reduced energy consumption and reduced harmful effects on the environment. In this context, the use of renewable energies has been a strong bet in fighting against environmental problems and in reducing energy consumption.

Among the different ways to obtain electric energy from renewable energies, the present work highlights the use of thermoelectric generators that use the body temperature gradient to obtain electric energy.

Thermoelectric generators use thermoelectricity, essentially the Seebeck effect and the Peltier effect to generate energy through the temperature difference that can be captured at the skin surface.

This energy captured by the thermoelectric generator has the purpose of feeding small electronic devices such as wristwatches, pulse oximeters or even pacemakers. In this way we can replace the use of batteries for those same devices.

The present work presents a study of the possible applications of a thermoelectric generator as well as the study of the parameters that influence their performance. Also, the optimization of a thermoelectric generator is presented, considering its different parameters and characteristics, with the objective of obtaining maximum power.

## Keywords

Thermoelectric generator, thermoelectricity, Seebeck effect, Peltier effect, thermal resistance, thermal conductivity, Matlab.





# Índice

Capítulo 1 – Introdução .....	1
1.1 Perspetivas gerais .....	1
1.2 Motivação .....	2
1.3 Objetivos .....	2
1.4 Estrutura da dissertação .....	2
Capítulo 2 – Termoelectricidade na produção de energia .....	4
2.1 Princípios que sustentam um circuito Energy Harvesting .....	4
2.1.1 Efeito de Seebeck .....	4
2.1.2 Efeito de Peltier .....	6
2.1.3 Efeito de Thomson .....	8
2.2 Módulos Termoelétricos .....	9
2.2.1 Refrigeradores termoelétricos .....	10
2.2.2 Geradores termoelétricos .....	10
2.2.3 Figura de mérito .....	15
2.2.4 Coeficiente de desempenho .....	17
2.2.5 Dissipador de calor .....	17
2.2.6 Conversor DC/DC .....	19
2.3 Princípios da captação de energia usando o calor corporal humano .....	19
Capítulo 3 – Estado da Arte .....	21
3.1 Estado da arte de refrigeradores termoelétricos .....	21
3.2 Estado da arte de geradores termoelétricos .....	22
3.2.1 TEGs utilizados individualmente para alimentação de dispositivos eletrónicos .....	22
3.2.2 Rede de TEGs para alimentação de dispositivos eletrónicos .....	24
Capítulo 4 – Fatores de otimização de um TEG alimentado pelo calor corporal humano .....	26
4.1 Relação entre as dimensões do TEG e a potência gerada .....	26
4.2 Influência da temperatura ambiente na potência gerada pelo TEG .....	29
4.3 Relação entre a zona de aplicação do TEG e a potência gerada .....	30
4.4 Influência da utilização indoor/outdoor na potência gerada pelo TEG .....	32
4.5 Necessidades energéticas de alguns dispositivos eletrónicos .....	33
4.6 Influência da resistência térmica e do fluxo de calor na potência gerada pelo TEG .....	34
4.7 Colocação de um TEG numa peça de roupa .....	35

4.8 Análise geral das condições de otimização de um TEG .....	38
Capítulo 5 – Estudo Experimental .....	39
5.1 Componente experimental .....	39
5.1.1 Métodos utilizados para a simulação de um TEG .....	39
5.1.2 Software utilizado no estudo experimental .....	41
5.1.3 Compreensão do software utilizado no estudo experimental .....	43
5.2 Procedimento experimental .....	44
5.3 Comentário conclusivo .....	45
Capítulo 6 – Análise e discussão de resultados .....	46
6.1 Análise de resultados em função da variação dos parâmetros geométricos .....	46
6.2 Análise de resultados em função da variação das propriedades termoelétricas .....	48
Capítulo 7 – Conclusões .....	52
7.1 Perspetivas futuras .....	53
Referências Bibliográficas .....	54

# Lista de Figuras

Figura 1 – Movimento dos elétrons de uma junção quando os materiais são submetidos a uma diferença de temperatura [2] .....	5
Figura 2 – Módulo Termoelétrico [2] .....	6
Figura 3 – Modos de operação do efeito de Peltier [3] .....	7
Figura 4 – Ilustração esquemática de um gerador de energia termoelétrica [6] .....	9
Figura 5 – Ilustração esquemática de um refrigerador termoelétrico [6] .....	9
Figura 6 – Exemplos comerciais de Módulos Termoelétricos [10] .....	10
Figura 7 – Estrutura de um termopar baseado em semicondutores [12] .....	11
Figura 8 – Termopar simples usado como gerador [12] .....	13
Figura 9 – Figura de mérito (Z) para diferentes materiais e diferentes temperaturas [14] .....	16
Figura 10 – Exemplo de módulo termoelétrico com dissipador [15] .....	17
Figura 11 – Dissipador de calor com ventilação forçada [16] .....	18
Figura 12 – Exemplo de modelo do conversor elevado quadrático [12] .....	19
Figura 13 (a) Visão geral esquemática do relógio de pulso termoelétrico; (b) Imagem obtida por um microscópio eletrônico de varrimento (SEM) do $\mu$ -TEG [24] .....	22
Figura 14 – (a) TEG de pulso: (1) módulo eletrônico, (2) placa de aquecimento e (3) dissipador térmico. (b) TEG semelhante usado ao lado de um relógio [26] .....	23
Figura 15 – (c) TEG com um dissipador térmico de pinos. (d) TEG à prova d'água para uso externo. (e) TEG com sensor wireless para medir a potência gerada por pessoas na vida real [26] .....	23
Figura 16 – Oxímetro de pulso alimentado por um TEG [27] .....	24
Figura 17 – sistema de eletroencefalografia de dois canais (EEG) alimentado por TEGs [28] .....	24
Figura 18 – Sistema de eletrocardiógrafo alimentado por 16 TEGs [26] .....	25
Figura 19 – Análise da dependência das características térmicas tanto do gerador termoelétrico quanto da termopilha com a espessura de um TEG: (a) a resistência térmica ideal de um TEG em vazio (1), do TEG correspondente (2) e da termopilha (3) e (b) a diferença de temperatura numa termopilha (1) e o fator N (2) [26] .....	27
Figura 20 – Relação entre a potência e a espessura de um TEG ideal sem radiador (círculos) e com o radiador de tamanho ideal (triângulos): (a) potência por unidade de volume, (b) potência produzida num TEG de 3 cm de diâmetro [26] .....	28
Figura 21 – Dependência da potência, por área, gerada por um TEG, relativamente à mudança de temperatura ambiente [33] .....	29
Figura 22 – Mapa da temperatura da mão [26] .....	30

Figura 23 – Mapa da temperatura do pulso, 27°C (a vermelho) e 22,3°C (a azul), medidos em ambientes fechados, editado de [26] .....	31
Figura 24 – Representação das artérias da mão e pulso, editado de [26] .....	31
Figura 25 - Potência produzida por um TEG no escritório numa pessoa sentada (em círculos) e em andamento (triângulos) [26] .....	33
Figura 26 - (a) Resistência térmica estimada por centímetro quadrado da pele medida em $22,7 \pm 0,5^{\circ}\text{C}$ no pulso de 77 pessoas sob o TEG anexado: (1) é a resistência térmica entre o núcleo do corpo e o sangue arterial no pulso, (2) é a resistência térmica entre o sangue arterial e o TEG. (b) Nove locais onde a resistência térmica do ser humano foi medida; e (c) é a resistência térmica do corpo humano a $23^{\circ}\text{C}$ , dependendo da sua localização no tronco [28] .....	35
Figura 27 – (a) - (d) 4 formas de integrar o TEG numa peça de roupa. Os números representam: (1) termopilha, (2) encapsulamento de polietileno, (3) espaçadores de isolamento térmico, (4) têxtil, (5) uma camada de espalhamento de calor de tecido de carbono, (6) espaçadores de espuma de neopreno, (7) camada de têxtil adicional e (8) espaçadores à base de algodão. (a) TEG passa pelo orifício feito no tecido. (b) TEG é colocado sob a camada têxtil. (c) A camada de espalhamento de calor é colada à placa fria e ao algodão, enquanto espaçadores de espuma permitem manter alguma distância entre a camada de dissipação de calor e a pele. (d) Camada adicional de algodão é colada ao TEG e costurada dentro da roupa [33] .....	36
Figura 28 – Resultados da obtenção de energia nos casos 1-3). Comparado com o TEG exposto ao ar ambiente (círculos fechados; correspondem à Figura 27 (a), a potência diminui apenas ligeiramente se o TEG for colocado sob o algodão [(círculos abertos; correspondem à Figura 27 (b)], mas diminui para metade dele se for observado espaço de ar entre o algodão e a placa fria (triângulos). As linhas horizontais marcam os níveis médios correspondentes.....	37
Figura 29 – Preenchimento dos parâmetros geométricos do TEG no simulador .....	42
Figura 30 – Identificação das dimensões geométricas do TEG .....	42
Figura 31 – Variação da potência em função da variação da diferença de temperatura, para diferentes espessuras do TEG .....	47
Figura 32 – Variação da potência em função da variação da diferença de temperatura, para diferentes números de termopares, $n$ .....	47
Figura 33 – Variação da tensão em vazio em função da variação da diferença de temperatura, para diferentes números de termopares, $n$ .....	48
Figura 34 – Variação da potência em função da variação da diferença de temperatura, para diferentes materiais semicondutores .....	49
Figura 35 – Variação da potência em função da variação da diferença de temperatura, para diferentes materiais da placa de cerâmica utilizada .....	50
Figura 36 – Variação da potência em função da variação da diferença de temperatura, para diferentes tipos de elétrodos .....	51

# Lista de Tabelas

Tabela 1 – Propriedades termoelétricas à temperatura ambiente [13] .....	16
Tabela 2 – Gamas de potência gerada por diferentes tipos de TEGs [29] .....	26
Tabela 3 – Representação de resultados experimentais [33] .....	31
Tabela 4 – Necessidades energéticas de alguns dispositivos eletrônicos [35] .....	33



## Lista de Acrónimos

TEM	Módulo termoelétrico
TEC	Refrigerador termoelétrico
TEG	Gerador termoelétrico
COP	Coefficiente de desempenho
EH	<i>Energy Harvesting</i>





# Lista de símbolos

$A$	Área	[m <sup>2</sup> ]
$f$	Frequência	[Hz]
$h$	Coefficiente de calor por convecção	[W/m <sup>2</sup> K]
$I$	Intensidade da corrente elétrica	[A]
$J$	Densidade da corrente elétrica	[A/m <sup>2</sup> ]
$n$	Número de junções de um conversor termoeletrico	
$P$	Potência	[W]
$Q$	Calor	[W/m <sup>2</sup> ]
$Q_c$	Calor libertado por efeito de Peltier	[W/m <sup>2</sup> ]
$Q_h$	Calor absorvido por efeito de Peltier	[W/m <sup>2</sup> ]
$Q_{Peltier\ Frio}$	Calor libertado por efeito de Peltier	[W/m <sup>2</sup> ]
$Q_{Peltier\ quente}$	Calor absorvido por efeito de Peltier	[W/m <sup>2</sup> ]
$R_c$	Resistências de contacto	[Ω]
$R_i$	Resistência interna do gerador termoeletrico	[Ω]
$R_j$	Resistência do metal de contacto das junções	[Ω]
$R_n$	Resistência do material tipo-n	[Ω]
$R_p$	Resistência do material tipo-p	[Ω]
$T$	Temperatura	[°C]
$T_{hot}$	Temperatura da face quente do TEG	[°C]
$T_{cold}$	Temperatura da face fria do TEG	[°C]
$U$	Fluxo de potência	[W]
$V$	Tensão	[V]
$Z$	Figura de mérito	



## Símbolos gregos

$\alpha$	Coeficiente de Seebeck	[V/K]
$\alpha_n$	Coeficiente de Seebeck no material tipo-n	[V/K]
$\alpha_p$	Coeficiente de Seebeck no material tipo-p	[V/K]
$k$	Condutibilidade térmica	[W/mK]
$\pi$	Coeficiente de Peltier	[V]
$\rho$	Resistividade elétrica	[ $\Omega$ m]
$\varphi$	Coeficiente de desempenho	
$\eta$	Rendimento	
$\Gamma$	Coeficiente de peltier	[W/A]
$\Delta T$	Diferença de temperatura	[K]



# Capítulo 1 – Introdução

## 1.1 Perspetivas gerais

O desenvolvimento de dispositivos eletrónicos portáteis, tais como sensores de rede e dispositivos autónomos no geral, levaram a uma maior procura energética, que irá afetar o balanço energético global, tendo consequências nocivas para o planeta. Face a este problema, a ambição do ser humano na busca de uma melhor qualidade de vida, leva-o a procurar alternativas que possam prolongar a esperança de vida no mundo industrializado.

Apesar dos avanços ao nível dos dispositivos eletrónicos, a sua alimentação passa fundamentalmente pela utilização de baterias, que embora se encontrem em contínuo melhoramento e aperfeiçoamento por parte de cientistas e engenheiros, enfrentam problemas relacionados com a relativamente limitada quantidade de energia que produzem, assim como relativamente ao seu curto tempo de vida. Para além disso, em certos casos, a substituição destas baterias pode acarretar riscos e custos para o paciente, face à necessidade da realização de uma cirurgia.

A alternativa à utilização das pilhas e baterias para alimentar estes dispositivos, é desenvolver sistemas que consigam aproveitar a energia do ambiente de forma sustentável, e suficiente para o seu funcionamento.

Surge então o conceito de Energy Harvesting, que procura recolher a energia disponível no ambiente, permitindo que esta seja utilizada pelos diversos dispositivos, e em alguns casos armazená-la para uma utilização posterior utilização. Atualmente, os sistemas existentes desta natureza passam, por exemplo, por células solares e sistemas eletromecânicos que convertem vibrações ou movimentos mecânicos em energia elétrica.

Outra forma de recolher energia disponível no ambiente, passa pelo aproveitamento do calor dissipado pelo corpo humano através de geradores de energia termoelétrica.

Os geradores termoelétricos aproveitam o gradiente de temperatura à superfície da pele, recuperando o calor dissipado pelo corpo, o que pode fornecer uma solução perpétua para alimentar dispositivos eletrónicos.

Esta dissertação apresenta, inicialmente, uma revisão bibliográfica que pretende dar a conhecer os métodos de funcionamento dos geradores termoelétricos, assim como as suas diversas aplicações. De seguida são analisados os parâmetros que influenciam o desempenho de um gerador termoelétrico, sendo que por fim é feita uma simulação, com recurso ao Matlab, que confirma a importância de cada um dos componentes que constituem um gerador termoelétrico.

## **1.2 Motivação**

A procura por um melhor estilo de vida e melhor esperança de vida, levam o ser humano a procurar alternativas tecnológicas que obviem os seus problemas e limitações, tanto a nível ambiental como a nível de saúde e bem-estar. Com o avanço da eletrónica e da medicina, podemos encontrar cada vez mais dispositivos e máquinas que nos permitem prolongar o tempo de vida. Por isso, o uso recorrente destes dispositivos para sobreviver é essencial.

No entanto, em casos em que o paciente necessita do auxílio de um dispositivo biomédico implantável, a utilização de baterias surge como um problema no que diz respeito à sua autonomia e tempo de vida útil, e à necessidade de uma intervenção cirúrgica invasiva para as substituir, causando desconforto para o paciente e implicando custos para o meio hospitalar.

O uso de geradores termoeletrônicos para substituir pilhas e baterias para fornecimento de energia elétrica é então uma alternativa bastante viável, que para além permitir o combate face aos problemas ambientais, permite também combater o problema relativamente à autonomia dos dispositivos eletrónicos e relativamente ao bem-estar do paciente, no caso de possuir um dispositivo eletrónico implantável.

## **1.3 Objetivos**

O objetivo principal deste trabalho é estudar o modo de funcionamento dos geradores termoeletrônicos, tal como as suas possíveis aplicações e melhorias. É também objetivo deste trabalho a análise sistemática da influência dos diferentes parâmetros característicos do dispositivo no seu desempenho. Ainda, pretende-se efetuar uma otimização de um dispositivo gerador com base na definição dos seus diferentes parâmetros, que conduz a uma geração máxima.

## **1.4 Estrutura da dissertação de mestrado**

Compõem presente trabalho seis capítulos, cuja organização se descreve de seguida.

No primeiro capítulo, Introdução, é feita uma introdução à temática da dissertação, à motivação, aos objetivos, e à estrutura da mesma.

No segundo capítulo, Termoeletricidade na produção de energia, encontra-se uma definição do conceito de Energy Harvesting, concretamente analisa-se o Energy Harvesting do corpo humano, apresenta-se uma breve exposição da história da termoeletricidade, bem como uma exposição e descrição detalhada dos principais efeitos subjacentes ao efeito termoeletrico. Referem-se os módulos termoeletricos, a dissipação de calor, a figura de mérito, o coeficiente de desempenho e o conversor DC/DC.

No terceiro capítulo, Estado de arte, é feita uma revisão bibliográfica sobre os protótipos de geradores termoeletricos wearable para energy harvesting do corpo humano que já existem, e dos projetos em curso de geradores termoeletricos para aplicações em dispositivos eletrónicos.

No quarto capítulo, Fatores de otimização de um TEG alimentado pelo calor corporal humano, são estudados os parâmetros qualitativos e quantitativos que podem influenciar a eficiência de um módulo termoeletrico tais como, as condições de temperatura ambiente ideias para fazer a recolha, o local de aplicação ideal e os parâmetros dos componentes de um TEG dependentes da temperatura.

No quinto capítulo, Estudo experimental, é feita a apresentação da componente experimental utilizada no âmbito do presente trabalho dissertativo. Neste contexto, serão apresentados os diversos materiais utilizados, nomeadamente o software de simulação adotado para efetuar as simulações pretendidas. Por conseguinte, também são descritas todas as etapas do processo de simulação e modelação realizadas, através da exposição de toda metodologia utilizada.

No sexto capítulo, Análise e discussão dos resultados, é feita a apresentação dos resultados com o objetivo principal de demonstrar e analisar o comportamento do gerador termoeletrico, através de variações de parâmetros geométricos, assim como a variação das propriedades termoeletricas associadas aos elementos ativos e passivos do TEG.

# Capítulo 2 - Termoeletricidade na produção de energia

## 2.1 Princípios físicos que sustentam um circuito *Energy Harvesting*

Um circuito Energy Harvesting, baseado num módulo termoelétrico, tem a capacidade de obter e fornecer energia elétrica através dos efeitos termoelétricos. Podemos definir a termoeletricidade como a conversão direta de calor em energia elétrica. O conceito de termoeletricidade deve ser utilizado quando nos referimos ao efeito irreversível descrito por Joule, mas também aos efeitos reversíveis descobertos por Peltier, Seebeck e Thomson [1].

### 2.1.1 Efeito de Seebeck

O primeiro efeito termoelétrico foi descoberto em 1821 pelo físico alemão Thomas Johann Seebeck. Este provou que, na presença de dois condutores diferentes combinados num circuito fechado, com as junções mantidas a diferentes temperaturas, é possível observar uma corrente estacionária  $I$  a fluir. Por outro lado, se o circuito for aberto longe da junção, pode observar-se o surgimento de uma força eletromotriz.

O efeito de Seebeck caracteriza-se pela produção de um potencial elétrico no circuito por efeito da diferença de temperaturas aos seus terminais, que irá fazer circular uma corrente elétrica [1].

A diferença de potencial produzida é proporcional à diferença de temperatura entre as duas junções. O efeito acima descrito pode ser quantificado pelo coeficiente de Seebeck ( $\alpha$ ) expresso em ( $\mu V/K$ ):

$$\alpha = \frac{\Delta V}{\Delta T} \quad (2.1)$$

Onde  $\alpha$  representa o coeficiente de Seebeck,  $\Delta V$  a diferença de potencial e  $\Delta T$  a diferença de temperatura entre as junções.



Através da Figura 1 podemos observar uma ilustração esquemática deste fenómeno, através da movimentação dos eletrões de uma junção composta por dois condutores distintos.

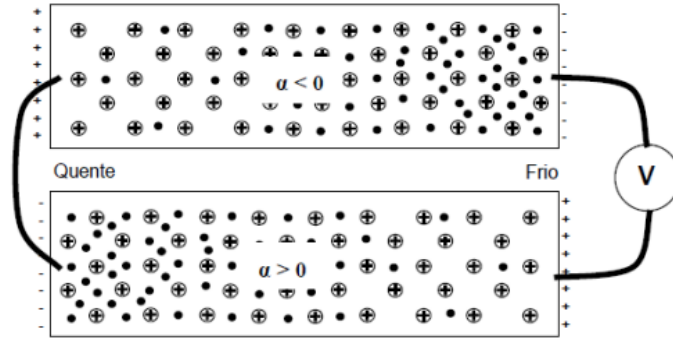


Figura 1 – Movimento dos eletrões de uma junção quando os materiais são submetidos a uma diferença de temperatura [2].

Quando as extremidades de um condutor são aquecidas e arrefecidas, os eletrões presentes na zona quente ficam excitados e tendem a movimentar-se para a zona de energia menos elevada. O sentido da corrente decorrente do efeito de Seebeck vai assim ser positivo ou negativo, dependendo do sentido do deslocamento dos eletrões, e consequentemente atribui-se também sinal positivo ou negativo aos coeficientes de Seebeck. Através da Figura 1 observamos que os dois condutores têm coeficientes de Seebeck diferentes. No condutor superior observamos um coeficiente de Seebeck negativo, ou seja, os eletrões deslocam-se da zona quente para a zona fria, criando-se assim uma diferença de potencial elétrico. Já no condutor inferior observamos um coeficiente de Seebeck positivo logo, os eletrões movimentam-se da zona fria para a zona quente, gerando um potencial elétrico nos terminais dos dois condutores na região fria, que será proporcional à diferença de temperatura entre as regiões quente e fria.

A relação acabada de descrever leva-nos a uma reorganização da Eq. 2.1, podendo ser traduzida pela Eq. 2.2:

$$\Delta V_s = (T_{quente} - T_{fria}) \times (\alpha_1 - \alpha_2) \quad (2.2)$$

em que  $\Delta V_s$  é a diferença de potencial,  $T_{quente}$  é a temperatura da superfície quente  $T_{fria}$  é a temperatura da superfície fria e  $\alpha_1 - \alpha_2$  a diferença do coeficiente de Seebeck.

O efeito de Seebeck pode ocorrer e ser utilizado em dois modos de operação diferentes: através de circuito aberto e através de circuito fechado. Em circuito aberto é medida a diferença de potencial gerada a partir de uma diferença de temperatura; temos como exemplo de aplicação os termopares. Em circuito fechado, adiciona-se uma carga para fechar o circuito, surgindo, consequentemente, uma corrente elétrica. Este é o modo de geração de energia; temos como exemplo da sua aplicação os módulos termoelétricos.

O módulo termoeétrico é um bom exemplo da aplicação do efeito de Seebeck. Na Figura 2 podemos observar a verde os módulos semicondutores do tipo p, e a laranja os módulos semicondutores do tipo n.

Os pares de semicondutores formam elementos ligados eletricamente em série e termicamente em paralelo. Durante o processo de geração, mantém-se um gradiente de temperatura entre os dois lados do módulo, o que, pelo efeito de Seebeck, se traduzirá numa transformação do fluxo de energia térmica em energia elétrica [1].

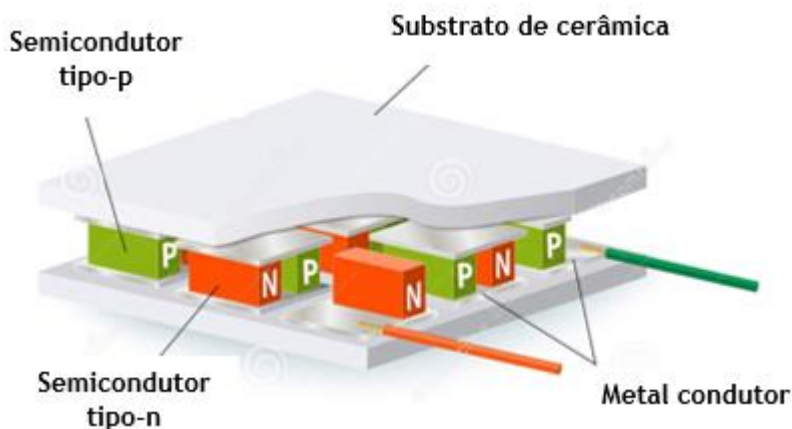


Figura 2– Módulo Termoeétrico [2].

### 2.1.2 Efeito de Peltier

Em 1834, Jean Peltier veio complementar ao efeito de Seebeck a descoberta doutro fenómeno, denominado posteriormente com o seu nome. Peltier reparou na presença de alterações de temperatura na junção formada por diferentes materiais, quando percorridas por uma corrente elétrica. O efeito de Peltier veio demonstrar que quando a junção de dois materiais distintos é percorrida por uma corrente elétrica, é libertada ou absorvida energia térmica nesta junção.

O local da libertação ou absorção de energia vai depender do sentido da corrente.

Na Figura 3 podemos observar, através do efeito de Peltier, que a direção da corrente  $I$  que percorre o condutor será contrária à direção da transmissão da energia térmica. Do lado esquerdo da Figura 3 podemos observar que o calor é libertado na parte superior da junção, funcionando o sistema como aquecedor. Do lado direito da Figura 3 podemos observar que o calor é absorvido na parte superior da junção, funcionando o sistema como arrefecedor.

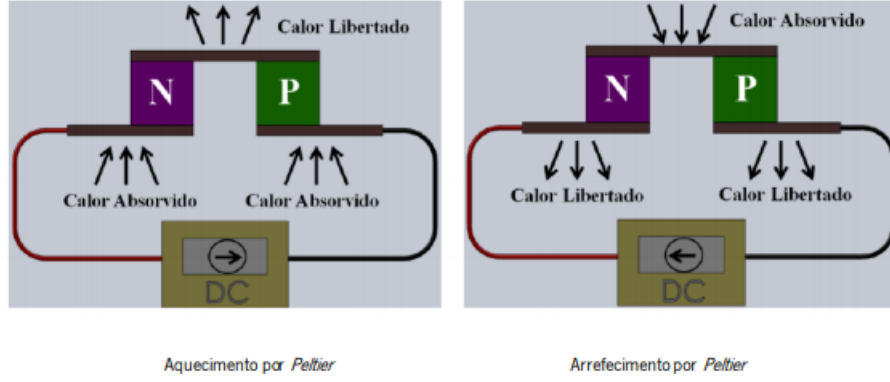


Figura 3 – Modos de operação do efeito de Peltier [3].

O efeito acima descrito, é qualificado como o coeficiente Peltier,  $\pi$ , e podemos determiná-lo relacionando-o com o coeficiente de Seebeck pela Eq. 2.3, em que  $T$  representa a temperatura da junção, em kelvin:

$$\pi = \alpha \times T \quad (2.3)$$

A quantidade de calor absorvida ou libertada também pode ser quantificada em cada junção, resultante do efeito Peltier:

$$Q_p = \pi \times I = \alpha \times I \times T \quad (2.4)$$

em que  $Q_p$  é o calor libertado pelo efeito de Peltier,  $\pi$  é o coeficiente de Peltier,  $I$  é a corrente elétrica,  $\alpha$  é o coeficiente Seebeck e  $T$  é a temperatura.

$$Q_{peltier\ quente} = (\alpha_p - \alpha_n) = T_{quente} \times I \quad (2.5)$$

em que  $Q_{peltier\ quente}$  é o calor absorvido pelo efeito de Peltier,  $\alpha_p$  é o coeficiente de Seebeck do material do tipo-p,  $\alpha_n$  é o coeficiente de Seebeck do material do tipo-n,  $T_{quente}$  é a temperatura da face quente e  $I$  é a corrente elétrica.

$$Q_{peltier\ frio} = (\alpha_p - \alpha_n) = T_{frio} \times I \quad (2.6)$$

em que  $Q_{peltier\ frio}$  é o calor libertado pelo efeito de Peltier,  $\alpha_p$  é o coeficiente de Seebeck do material do tipo-p,  $\alpha_n$  é o coeficiente de Seebeck do material do tipo-n,  $T_{frio}$  é a temperatura da face fria e  $I$  é a corrente elétrica.

Também podemos descrever o efeito de Peltier, através da seguinte equação:

$$U = \Gamma J \quad (2.7)$$

onde  $U$  é o fluxo de potência,  $\Gamma$  é o coeficiente de Peltier e  $J$  a densidade de corrente elétrica [1], [4].

### 2.1.3 Efeito de Thomson

Quando um condutor elétrico é atravessado por uma corrente elétrica, sendo exposto a um certo gradiente térmico, observa-se a ocorrência de um aquecimento ou arrefecimento, o que pode ser descrito pelo efeito de Thomson.

De acordo com o efeito Thomson, quando uma corrente elétrica flui através de um condutor com um determinado gradiente de temperatura ao longo do tempo, o calor será absorvido ou dissipado pelo condutor gerando um aquecimento ou arrefecimento,  $q_T$ . Esse calor tem a particularidade de ser absorvido ou dissipado dependendo da direção da corrente elétrica e do gradiente de temperatura [5].

O efeito Thomson também é considerado uma versão contínua do efeito Peltier, que foi descoberta por William Thomson em 1851 e pode ser calculada da seguinte forma [6]:

$$q_T = \tau I \frac{dT}{dx} \quad (2.8)$$

onde  $\tau$  é o coeficiente de Thomson (medido em V/K),  $q_T$  é o fluxo de calor por unidade de comprimento do condutor e  $dT/dx$  o gradiente de temperatura.

A tecnologia da termoeletrônica é geralmente categorizada em TEGs e TECs. Os TEGs são utilizados para produção de energia quando dois materiais estão em temperaturas diferentes, como ilustrado na Figura 4. Por outro lado, os TEC foram desenvolvidos para fins de arrefecimento quando uma força móvel externa (tensão de polarização) é aplicada aos dois materiais, conforme ilustrado na Figura 5. Resumindo, os TEGs são considerados motores de produção de energia enquanto que os TECs são considerados refrigeradores. O desempenho dos TEGs e TECs pode ser avaliado através das equações de eficiência e do coeficiente de desempenho (COP).

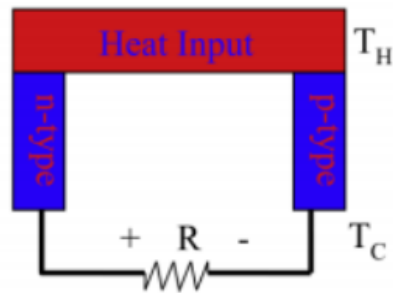


Figura 4 – Ilustração esquemática de um gerador de energia termoelétrica [6].

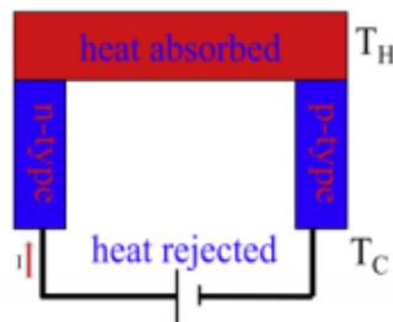


Figura 5 – Ilustração esquemática de um refrigerador termoelétrico [6].

## 2.2 Módulos termoelétricos

Os módulos termoelétricos (TEM) são dispositivos que convertem energia elétrica num gradiente de temperatura e vice-versa, consoante o efeito termoelétrico em que o seu funcionamento seja baseado. Dividindo-se assim em TEGs (geradores termoelétricos), que utilizam o efeito de Seebeck para converter a variação de energia térmica, resultante de um gradiente de temperatura, em energia elétrica, e TECs (refrigeradores termoelétricos) que fazem uso do efeito de Peltier para converter energia elétrica num gradiente de temperatura. Um módulo termoelétrico consiste num arranjo de blocos semicondutores do tipo-n e do tipo-p, de dimensões reduzidas, ligados eletricamente em série, para aumentar a tensão de operação, e termicamente em paralelo, para aumentar a condutividade térmica, entre duas placas de cerâmica com boa condutividade térmica. Esta montagem específica tem como objetivo fazer com que todos os elementos do módulo termoelétrico bombeiem calor na mesma direção [7].

Podemos apontar como principais vantagens de um TEM [8 e 9]:

- Ausência de ruídos e vibrações;
- Múltiplas funcionalidades;
- Não apresenta componentes mecânicos móveis;
- Controlo de temperatura de alta precisão;
- Durabilidade;

- São evitados danos ambientais devido à não necessidade de utilização de fluídos no seu funcionamento;
- Baixo custo de manutenção.

Estes sistemas são utilizados em diversas áreas desde equipamento militar, aeroespacial, produção de energia entre outros [8 e 9]

O tamanho padrão dos módulos termoeétricos varia entre 4×4 mm e 50×50 mm e a sua espessura varia entre 2 e 5 mm. É possível estes módulos serem usados individualmente ou agrupados eletricamente em série, paralelo ou paralelo-série.

Na Figura 6 podemos observar exemplos de módulos termoeétricos.

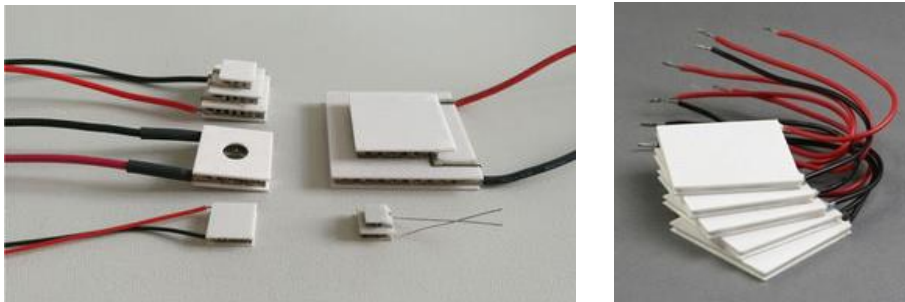


Figura 6 – Exemplos comerciais de Módulos Termoeétricos [10].

### 2.2.1 Refrigeradores termoeétricos

Um sistema TEC, que converte energia elétrica num gradiente de temperatura, é geralmente composto por um circuito elétrico, um ou mais dissipadores de calor, uma ou mais fontes de calor e uma unidade de controlo. São especialmente úteis para aplicações de controlo de temperatura precisos, onde precisão, simplicidade, compatibilidade e confiabilidade são vantagens destes sistemas [6 e 7].

### 2.2.2 Geradores termoeétricos

Opostamente ao funcionamento de um TEC um sistema TEG produz energia convertendo energia térmica em energia elétrica. Estes sistemas são usados para aproveitar o calor residual com a diferença de temperatura disponível entre a faces quente e fria do sistema, produzindo assim energia elétrica. Os TEGs estão a tornar-se proeminentes em aplicações e mercados para sistemas automotivos e sensores remotos com alimentação própria e sistemas de comunicação wireless [7].

Os TEGs são formados por vários pares termoeétricos de semicondutores, do tipo-n e do tipo-p, conectados nas suas junções por ligas metálicas condutoras. Estas junções estão colocadas entre duas placas cerâmicas, que possuem uma baixa condutividade térmica, fornecendo uma boa robustez mecânica ao módulo.

O material semicondutor mais utilizado é o telureto de bismuto ( $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ ). A potência de saída é diretamente proporcional à superfície das células e é diretamente proporcional ao número de blocos semicondutores.

Os semicondutores do tipo p possuem um coeficiente de Seebeck positivo  $\alpha_p$  e os do tipo n, um coeficiente negativo  $\alpha_n$ , portanto o coeficiente global de Seebeck da junção

p-n é positivo,  $\alpha_{pn} = \alpha_p - \alpha_n$ . O termopar é então situado entre dois isoladores térmicos, eletricamente ligados, e colocados entre duas placas de cerâmica, para permitir uma baixa condutividade térmica e uma robustez mecânica elevada [11].

Na Figura 7 podemos ver um exemplo da ilustração de um termopar baseado em semicondutores.

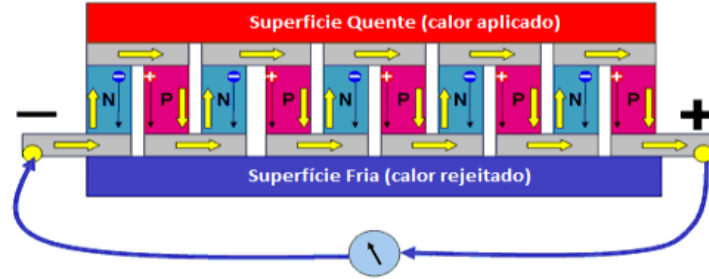


Figura 7 – Estrutura de um termopar baseado em semicondutores [12].

A junção p-n é responsável por gerar uma tensão elétrica que é proporcional à diferença de temperatura entre os lados quente e frio do gerador, sendo a tensão de saída multiplicada pelo número de junções (número de ligações em série de várias junções p-n ( $n$ )) dada por:

$$V_{out} = n. (\alpha_p - \alpha_n). \Delta T \quad (2.9)$$

onde  $(\alpha_p - \alpha_n)$  corresponde ao coeficiente de Seebeck dos materiais semicondutores utilizados, tipo-p e tipo-n respetivamente, e  $\Delta T$  à diferença de temperatura entre as faces.

Num gerador termoelétrico a resistência interna ( $R_i$ ) é também considerada para a potência disponível na saída e é dada por:

$$R_i = R_n + R_p + 4. R_c + R_j \quad (2.10)$$

onde a resistência interna ( $R_i$ ) é obtida pela soma das resistências dos elementos termoelétricos ( $R_n$  e  $R_p$ ), da resistência do metal de contacto das junções ( $R_j$ ) e das resistências de contacto ( $R_c$ ). Geralmente, nos geradores termoelétricos despreza-se a resistência do metal das junções ( $R_j$ ) face ao seu valor muito inferior relativamente ao dos restantes elementos constituintes da resistência interna.

Outra forma de calcular a resistência interna é através da seguinte fórmula:

$$R_i = 2\rho h / A_{perna} \quad (2.11)$$

A resistência interna é calculada através das características do termopar, como a resistividade elétrica  $\rho$  e as dimensões físicas de uma das pernas do termopar, como a altura  $h$  e a área  $A_{perna}$  da perna [11].

Na maior parte dos casos os fabricantes deste tipo de módulos termoeletrônicos fornecem o valor da resistência interna, considerando todas as outras resistências  $R_c$ ,  $R_p$  e  $R_n$ .

Com estes dados podemos calcular a potência elétrica máxima ( $P_{max}$ ) que o módulo termoeletrônico pode fornecer em plena carga, obtida quando a resistência interna do conversor é igual à resistência da carga associada. Este caso aplica-se se o módulo termoeletrônico consistir num número  $n$  de termopares.

$$P_{max} = \frac{V_{out}^2}{4.R_i} = \frac{(n.(\alpha_p - \alpha_n).\Delta T)^2}{4.n(R_n + R_p + 4R_c + 2R_f)} \quad (2.12)$$

Para manter a diferença de temperatura constante no conversor termoeletrônico, e de forma a que este continuar a debitar corrente elétrica ( $I$ ), vai ser necessário fornecer calor ao lado quente do módulo ( $Q_h$ ) e remover do lado frio ( $Q_f$ ). As equações que quantificam essa energia térmica são:

$$Q_h = \kappa.\Delta T + (\alpha_p - \alpha_n).\Delta T.I - \frac{1}{2}R.I^2 \quad (2.13)$$

e

$$Q_c = \kappa.\Delta T + (\alpha_p - \alpha_n).\Delta T.I - \frac{1}{2}R.I^2 \quad (2.14)$$

Os materiais termoeletrônicos, utilizados na fabricação destes dispositivos, devem possuir elevados coeficientes de Seebeck ( $\alpha$ ), de modo a gerar tensões de saída mais elevadas, baixa resistividade elétrica ( $\rho$ ), que irá proporcionar baixa resistência interna, e baixa condutividade térmica ( $\kappa$ ) de forma a que a energia térmica exigida para alimentar o gerador seja minimizada. Para além disso, deve ser tomado em conta o parâmetro ZT, utilizado para quantificar o desempenho dos geradores.

Se considerarmos um termopar ligado a uma resistência variável ( $R_L$ ), como podemos ver na Figura 8, o rendimento do módulo vai depender do valor  $R_L$  e das características do termopar [11].



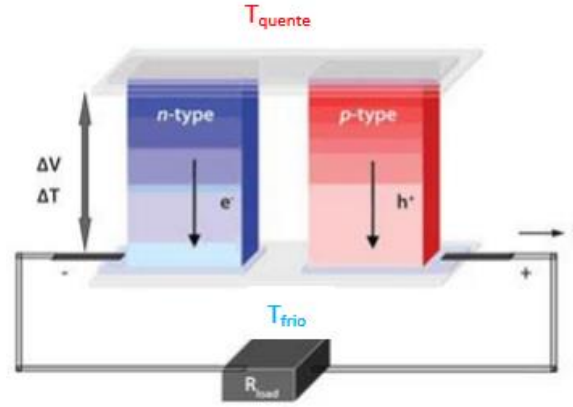


Figura 8 – Termopar simples usado como gerador [12].

Os fatores relevantes associados ao gerador termoelétrico são a potência elétrica entregue à carga e o rendimento, que é a razão entre a potência de saída para a taxa a que o calor é retirado a partir da fonte [11].

A força eletromotriz térmica (f.e.m) é dada por  $(\alpha_p - \alpha_n)(T_{hot} - T_{cold})$  que dá origem a uma corrente  $I$ , que pode ser expressa como [11]:

$$I = \frac{(\alpha_p - \alpha_n)(T_{hot} - T_{cold})}{R_n + R_p + R_L} \quad (2.15)$$

Com isto podemos retirar a potencia entregue à carga que é:

$$W = P_{out} = I^2 \cdot R_L = \left\{ \frac{(\alpha_p - \alpha_n)(T_{hot} - T_{cold})}{R_n + R_p + R_L} \right\}^2 \cdot R_L = \frac{\alpha_{pn}^2 \beta^2 \Delta T^2 R_L}{(R_i + R_L)^2} \quad (2.16)$$

A potência útil é máxima quando a carga é nominal, ou seja, a resistência de carga é igual à resistência interna do gerador:

$$P_{out, \max} = \frac{\alpha_{pn}^2 \beta^2 \Delta T^2}{4R_i} \quad (2.17)$$

em que  $\beta$  é um coeficiente que tem em conta as perdas térmicas das placas de cerâmica.

Parte do calor proveniente da fonte é usado para balancear o arrefecimento de Peltier, associado ao fluxo de corrente. Existe também o fluxo de calor gerado da condução entre os ramos. Então, a taxa total de fluxo de calor é dada por [11]:

$$Q_{hot} = (\alpha_p - \alpha_n) I T_{hot} + (K_p + K_n)(T_{hot} - T_{cold})(w) \quad (2.18)$$

O rendimento será igual à razão  $w/q_{hot}$ .

Como a potência útil é máxima quando a resistência de carga é igual à resistência interna do gerador, mesmo não havendo perdas de condução térmica, o rendimento pode nem ultrapassar os 50% e um aumento da resistência de carga faz aumentar o rendimento, mas reduz a potência de saída do gerador [11].

Podemos calcular o rendimento do módulo termoelétrico,  $\eta$ , através de:

$$\eta = \frac{(T_{hot} + T_{cold})(M - 1)}{T_{hot} \left( M + \frac{T_{cold}}{T_{hot}} \right)} \quad (2.19)$$

em que  $M$ , é a razão entre a resistência de carga e a resistência interna do gerador, e é dada por:

$$M = \frac{R_L}{R_p + R_n} = (1 + ZT_m)^2 \quad (2.20)$$

Quanto maior o fator  $ZT_m$ , designado por Figura de Mérito, maior o  $M$ , o que influencia que o rendimento se aproxime mais do rendimento do ciclo de Carnot  $(T_{hot} - T_{cold})/T_{hot}$ , dado por:

$$ZT_m = \frac{\alpha^2 \rho}{K_t} \quad (2.21)$$

onde,  $\alpha$  é designado por coeficiente de Seebeck,  $\rho$  por resistividade elétrica,  $K$  por condutividade térmica e  $T$  a temperatura [11].

O rendimento máximo será por sua vez, dada por:

$$\eta_{\text{Máx}} = \frac{\Delta T}{T_{hot}} \cdot \frac{\sqrt{1 + ZT_m} - 1}{\sqrt{1 + ZT_m} + 1} \quad (2.22)$$

### 2.2.3 Figura de mérito

A figura de mérito é responsável pela caracterização da eficiência dos sistemas termoeletrônicos, sendo por isso utilizada a nível mundial por cientistas e engenheiros quando se pretende estabelecer uma relação de comparação entre estes sistemas. Este conceito é representado usualmente por  $Z$  ou por  $ZT$ , e relaciona três tipos de grandezas: propriedades elétricas, propriedades térmicas dos materiais, assim como a temperatura absoluta de funcionamento. A figura de mérito é definida da seguinte forma:

$$Z = \frac{\alpha^2 \rho}{\kappa} \quad (2.23)$$

onde  $\alpha$  representa o coeficiente de Seebeck,  $\rho$  a resistividade elétrica e  $\kappa$  a condutividade térmica. Uma vez que esta não é constante com a temperatura, é muitas vezes representada de forma adimensional, sendo calculada pela seguinte equação para uma determinada temperatura:

$$ZT = \frac{\alpha^2 \rho}{\kappa} T \quad (2.24)$$

Os materiais mais indicados para utilizar no módulo termoeletrônico são aqueles que apresentam uma boa figura de mérito, uma vez que a sua eficiência de conversão de energia térmica para elétrica é maior. Quanto mais elevado for o coeficiente de Seebeck, mais elevados serão os valores de tensão de saída do conversor, tendo por isso um melhor desempenho. Devemos também ter em conta a escolha de um material com baixa resistividade elétrica, proporcionando uma baixa resistência interna reduzindo o calor produzido por efeito de Joule, e uma baixa condutividade térmica. A resistividade elétrica encontra-se interligada com a condutividade térmica, ou seja, um metal que possua baixa resistividade elétrica, possui uma elevada condutividade térmica tornando-o um excelente condutor. Deve-se, portanto, utilizar materiais que possuam uma boa relação entre as grandezas mencionadas, traduzindo-se numa boa figura de mérito [13].

A Figura 9 demonstra-nos a figura de mérito ( $ZT$ ) para diferentes materiais e diferentes temperaturas.

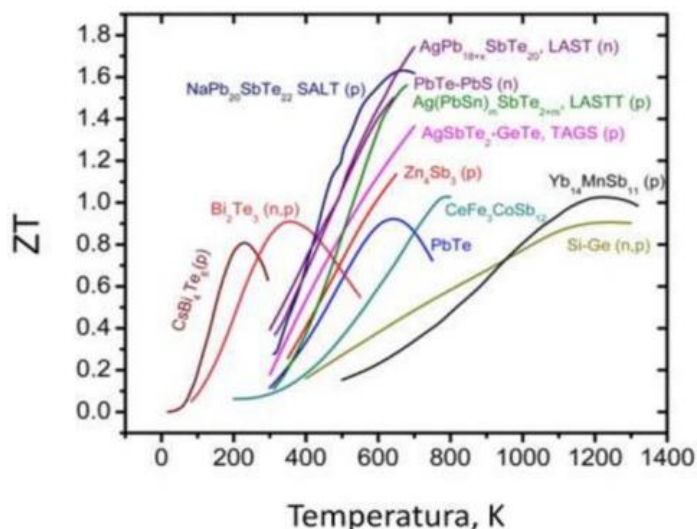


Figura 9 - Figura de mérito ( $ZT$ ) para diferentes materiais e diferentes temperaturas [14].

Pode-se observar que os materiais mais indicados para a utilização nos conversores termoelétricos na gama das temperaturas ambiente (250-350 K), são os que contêm telúrio (Te), Bismuto (Bi), Antimónio (Sb) e Selénio (Se). Na Tabela 1 podem-se observar as propriedades termoelétricas destes materiais à temperatura ambiente.

Tabela 1 - Propriedades termoelétricas à temperatura ambiente [13].

Material	Símbolo	Coefficiente de Seebeck $\alpha$ ( $\mu V K^{-1}$ )	Resistividade $\rho$ ( $\mu \Omega m$ )	Condutividade térmica $\kappa$ ( $W m^{-1} K^{-1}$ )	Figura de mérito $ZT$ (300K)
Níquel	Ni	-18	0.070	91	0.015
Crómio	Cr	18	0.13	94	0.008
Bismuto	Bi	-60	1.15	8.4	0.110
Antimónio	Sb	40	0.42	18.5	0.062
Telureto de bismuto	$Bi_2Te_3$	-240	10	2.02	0.86
Telureto de antimónio	$Sb_2Te_3$	92	3.23	1.63	0.48

### 2.2.4 Coeficiente de desempenho

Podemos definir o coeficiente de desempenho como o quociente entre a taxa de remoção do calor do corpo frio e a potência aplicada ao circuito, de acordo com a Eq. (2.25).

$$\varphi = \frac{Q_f}{P} \quad (2.25)$$

O coeficiente de desempenho (COP) depende da diferença de temperatura entre os corpos quente e frio. Quanto maior for o COP menor será a diferença de temperatura. Podemos determiná-lo através de:

$$\varphi = \frac{aT_f - \frac{1}{2}I^2R - K\Delta T}{(a\Delta T + I^2R)} \quad (2.26)$$

### 2.2.5 Dissipador de calor

O calor gerado por um equipamento eletrônico não é totalmente aproveitado de forma útil, o que significa que grande parte da energia produzida pelo equipamento está a ser desperdiçada para o ambiente. Este calor não aproveitado contribui para o aquecimento do aparelho, comprometendo assim o seu modo correto de funcionamento e a sua integridade, o que vai encurtar o período de vida do mesmo. Para colmatar a necessidade da dissipação do calor gerado por um componente eletrônico, um conversor termoelétrico ou qualquer outro objeto que se deseje refrigerar, são utilizados dispositivos cujo objetivo é absorver e dissipar o calor desse componente, através do contacto térmico direto (condução) e convecção. Estes dispositivos são denominados dissipadores de calor, e possuem diversas configurações.

Podemos observar na Figura 10 um exemplo de um módulo onde um gerador termoelétrico se encontra posicionada entre dois TECs (refrigerador termoelétrico), que têm a função de provocar um gradiente controlado de temperatura [15].

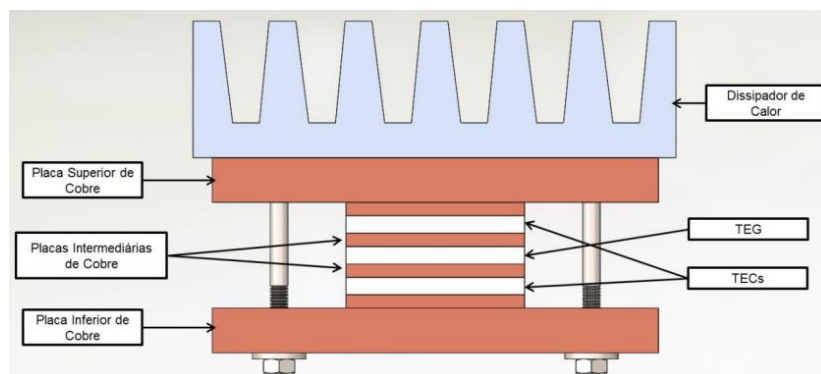


Figura 10 – Exemplo de módulo termoelétrico com dissipador [15].

No exemplo ilustrado na Figura 10, a placa superior de cobre, assim como a inferior, tem uma ranhura de forma a permitir o alojamento do termopar. Nesta placa também são alojadas quatro buchas de teflon onde são assentes parafusos, de forma a reduzir o calor transmitido dos parafusos à placa inferior. A placa inferior está em contato com a superfície fria de Peltier, servindo apenas de estrutura para o conjunto. As placas intermédias têm a função de transmitir o calor entre os TECs e o TEGs. Além disso, alojam os termopares responsáveis pelas medições de temperatura do gerador termoelétrico.

De forma a aumentar o seu rendimento, os dissipadores de calor possuem normalmente uma estrutura com ranhuras e, alhetas, aumentando assim a superfície de contacto entre o dissipador e o fluido adjacente onde o calor se irá dissipar. A transferência de calor na superfície estendida ocorre por condução no interior do sólido, e por convecção na superfície das alhetas [16].

Geralmente os materiais mais utilizados na construção de dissipadores de calor, têm uma boa capacidade de condução térmica, normalmente alumínio ou ligas em que o alumínio é o componente principal (237 [W/mK]). Outro material também utilizado é o cobre (398 [W/mK]), sendo que este possui um coeficiente de condutividade térmica superior ao do alumínio. No entanto, o preço deste material é mais elevado, o que se traduz num custo superior para esses dissipadores. Alguns dissipadores de calor possuem componentes acoplados que permitem aumentar a velocidade de escoamento do fluido pelas alhetas, como por exemplo um ventilador, ou qualquer dispositivo que implique uma ventilação forçada.

Estes dispositivos vão melhorar as trocas térmicas, por convecção forçada, permitindo uma melhor dissipação de calor (Figura 11).



Figura 11- Dissipador de calor com ventilação forçada [16].

Dado que os conversores termoelétricos são componentes que utilizam no seu fabrico materiais semicondutores com boa condutividade térmica, e produzem uma grande quantidade de calor por área devido às suas dimensões reduzidas, torna-se indispensável a utilização de dissipadores de calor, de preferência com ventilação forçada. Para além da vantagem de se conseguir obter uma temperatura mais baixa na face fria, que se traduz num maior gradiente de temperatura no conversor significando um melhor desempenho, prolonga-se também o período de vida útil do componente [16].

### 2.2.6 Conversor DC/DC

De modo a elevar o valor da tensão de saída dos módulos termoeletricos deve-se utilizar um conversor, por exemplo um conversor elevador quadrático, no sistema, pois este permite obter valores de relação entrada/saída bastante elevados. Por exemplo, no estudo da dissertação encontrada em [12] permite que seja possível ter uma tensão de entrada de 54V à saída dos módulos termoeletricos e elevá-la a 400V à saída do conversor.

Na Figura 12 podemos ver um exemplo de um conversor elevador quadrático, um conversor de contínuo para contínuo (DC/DC) elevador de tensão, baseado em dois conversores elevadores ligados em série. A principal vantagem deste conversor é o facto de ser preciso um menor número de semicondutores comandados para o mesmo fator de ciclo (“duty-cycle”) e o ganho estático ser o quadrado do valor do que se obtém através de um conversor simples [12].

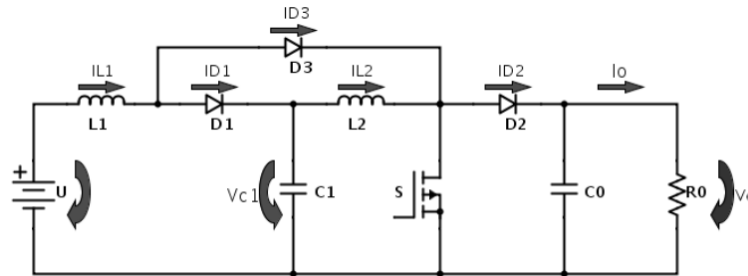


Figura 12 – Exemplo de modelo do conversor elevado quadrático [12].

## 2.3 Princípios da captação de energia usando o calor corporal humano

Um sistema de captação de energia termoeletrica aproveita qualquer diferença de temperatura entre as suas duas superfícies, uma superfície quente e outra fria. O que significa que para a recolha de energia através da diferença de temperatura corporal, a pele humana representa a superfície quente, sendo que o meio ambiente que a rodeia vai representar a superfície fria.

Os geradores de energia wearable (vestíveis) são um dos avanços tecnológicos mais recentes no campo da eletrónica portátil. Os TEGs usam a diferença de temperatura entre a pele humana e o ambiente circundante para gerar energia e convertê-la numa saída de corrente elétrica útil, a qual vai depender da temperatura do núcleo de um corpo humano, que varia entre 28°C e 37°C, e da variação da temperatura ambiente, que varia de 0°C a 35°C [16].

Geralmente, o fluxo de calor disponível na pele sob condições sedentárias é de 1 a 10mW/cm<sup>2</sup>, com 22°C de temperatura ambiente. A testa produz um fluxo de calor maior do que a área coberta pelas roupas. Devido ao isolamento térmico proporcionado pelas roupas, pouco calor é dissipado da pele e, em média, apenas 3-6 mW/cm<sup>2</sup> é observado em ambientes fechados [24]. É possível que o fluxo de calor seja superior (10 a 20 mW/cm<sup>2</sup>) no pulso pois nele passa a artéria radial portadora de calor [17].

Teoricamente os TEGs wearable podem gerar um máximo de  $180 \mu\text{W}/\text{cm}^2$  de energia através da superfície da pele (com uma temperatura da pele de  $34^\circ\text{C}$  e um fluxo de calor de  $20 \text{ mW}/\text{cm}^2$ ) a  $22^\circ\text{C}$  de temperatura ambiente [20]. No entanto as densidades de energia geradas pelos TEGs feitos de  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ , material mais utilizado devido à sua figura de mérito (ZT), foram relatados como sendo de  $60 \mu\text{W}/\text{cm}^2$  em espaço interior [17].



## Capítulo 3 - Estado da arte

O Estado da Arte como capítulo assume um papel mais relevante quando incorporado numa dissertação académica e tem como objetivo fazer uma breve introdução a um conjunto de temas, que servem de pilares para explicar as contribuições da dissertação para o estado de conhecimento atual, ou seja, destina-se a documentar tudo aquilo que está feito atualmente no campo do assunto em estudo, evitando, de certa forma, o investimento em trabalhos já efetuados.

Neste capítulo, serão apresentadas as principais áreas relacionadas com o desenvolvimento de sistemas termoelétricos, geradores termoelétricos e refrigeradores termoelétricos com o foco para a aplicação de micro-TEGs wearable para a alimentação de dispositivos de diagnóstico humano, de mecanismos de captação de energia para dispositivos médicos, nomeadamente, sistemas de captação de energia que tiram proveito da energia térmica fornecida pelo corpo humano.

Posto isto, o Estado da Arte é sem dúvida uma das partes mais importantes de todo o trabalho, uma vez que, faz referência ao que já está descoberto sobre as temáticas envolvidas na pesquisa da dissertação, apresentando sempre uma atividade crítica e reflexiva, na qual todos os conteúdos apresentados são devidamente referenciados dando sempre o mérito aos autores correspondentes.

### 3.1 Estado da arte de Refrigeradores Termoelétricos

Os refrigeradores termoelétricos têm vindo a ser utilizados nos ramos da eletrónica e microeletrónica para a gestão e controlo de temperatura, uma vez que podem absorver calor e transferi-lo de um lado do refrigerador para o outro, ao serem alimentados [18].

Cheng e Lin [19] utilizaram algoritmos genéticos para otimizar o tamanho das pernas do componente termoelétrico, a fim de aumentar a capacidade de refrigeração de um TEC. Saifizi et al. [20] avaliaram um sistema híbrido que empregava uma bomba de calor termoelétrica para fornecer uma baixa temperatura para manter embalagens de vacinas. Gould et al. [21] relataram a abordagem com um TEC mantendo o CPU de um computador abaixo da temperatura ambiente.

Chowdhury et al. [22] desenvolveram um TEC thin-film formado por 49 pernas PN individuais integradas em série. Além disso, o TEC foi soldado em um espalhador de calor e testado para arrefecer um chip de silício com um fluxo de calor localizado de  $1250\text{W.cm}^{-2}$ . O resultado mostrou uma diminuição de 7,3 K quando a corrente do TEC é de aproximadamente 3A, em comparação com apenas um dissipador de calor e nenhum TEC.

## 3.2 Estado da arte de Geradores Termoelétricos

Os sistemas de geradores termoelétricos têm sido amplamente utilizados para a alimentação de dispositivos eletrônicos. Dependendo do sistema e dispositivos que alimentam, assim como das suas necessidades energéticas, os TEGs podem ser utilizados de forma individual ou num sistema de vários TEGs para casos de maiores necessidades energéticas.

### 3.2.1 Geradores termoelétricos utilizados individualmente para alimentação de dispositivos eletrônicos

Hsiao et al. [23] estudaram e modelaram uma unidade TEG com o objetivo de aumentar o desempenho de um motor automóvel. A unidade de geração mais alta relatada foi de  $51.13 \text{ mW/cm}^2$  com uma diferença de temperatura de  $290^\circ\text{C}$ .

A companhia japonesa Seiko descreveu em detalhe o processo de fabrico de um  $\mu\text{TEG}$  com capacidade de produção de energia suficiente para alimentar um relógio de pulso, Figura 13 (a). O  $\mu\text{TEG}$ , Figura 13 (b), era composto por 104 termopares com um tamanho total de  $2 \text{ mm} \times 2 \text{ mm} \times 1.3 \text{ mm}$  e a dimensão relatada de cada termopar foi de  $80 \mu\text{m} \times 60 \mu\text{m} \times 600 \mu\text{m}$ . Os componentes Bi-Te foram escolhidos como material termoelétrico devido ao excelente desempenho termoelétrico em temperatura ambiente. Os resultados obtidos indicam que a potência elétrica máxima de saída estimada foi de  $22.5 \mu\text{W}$  [24].

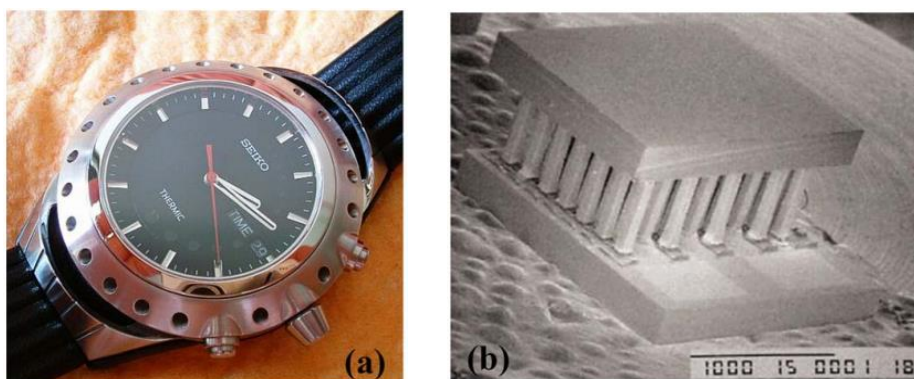


Figura 13 - (a) Visão geral esquemática do relógio de pulso termoelétrico; (b) Imagem obtida por um microscópio eletrónico de varrimento (SEM) do  $\mu\text{-TEG}$  [24].

H. Bottner et al. relataram o estado de desenvolvimento do Micropelt  $\mu\text{-TEG}$  na International Conference on Thermoelectrics em 2007 [32]. A tecnologia em plataforma Micropelt na época permitia dispositivos com até aproximadamente 8000 pares p-n por  $\text{cm}^2$ . A tensão de circuito aberto alcançada foi de cerca de  $2,3 \text{ V}$  com uma diferença de temperatura de  $10 \text{ K}$ . A potência máxima de saída foi medida em  $2,8 \text{ mW}$ , suficiente para o fornecimento de energia de redes de sensores wireless de baixa potência.

Leonov V., investigador do IMEC, foi um dos pioneiros na alimentação de dispositivos através da temperatura corporal humana. Um dos primeiros trabalhos realizados com TEGs foi realizado pelo IMEC, da Bélgica em 2004. Foi desenvolvido um TEG de aplicação no pulso para fornecer energia a um sensor wireless, pode ser observado na Figura 14. Foram gerados  $250 \mu\text{W}$  com uma temperatura ambiente de

22°C, mas somente 40% da energia gerada (100  $\mu$ W) foi transferida do nó do sensor o que se deveu a baixa eficiência do conversor de aumento de tensão, componente de circuito necessário, porque a tensão de saída do TEG flutua dentro da faixa de 0,7-1,5 V. Na saída de 0,7 V, a energia não é suficiente para o sensor, enquanto que a 1,5 V, muito mais energia é produzida [26].

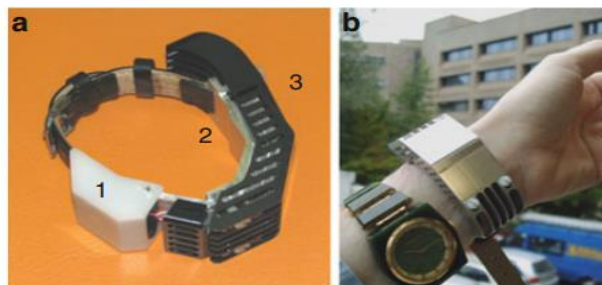


Figura 14- (a)TEG de pulso: (1) módulo eletrônico, (2) placa de aquecimento e (3) dissipador térmico. (b)TEG semelhante usado ao lado de um relógio [26].

Em 2005-2006, a equipa de Leovov fabricou TEGs de pulso do tamanho de relógios, com três designs diferentes (Figura 15 (c)-(e)). A 20–22 ° C em ambientes fechados, o TEG produz 200–300 mW a uma tensão de circuito aberto de 2 V. Essa potência diminui para cerca de 100–150 mW à noite ou numa pessoa em repouso por um longo período, ou seja, em baixa taxa metabólica. No entanto, com alguns minutos de caminhada em ambientes fechados, aumenta para 500-700 mW. Esse aumento de energia é explicado pela convecção de ar forçado numa pessoa em movimento. Pelo mesmo motivo, ou seja, devido ao vento e a mais atividades físicas, os TEGs wearable funcionam melhor ao ar livre.



Figura 15- (c) TEG com um dissipador térmico de pinos. (d)TEG à prova d'água para uso externo. (e) TEG com sensor wireless para medir a potência gerada por pessoas na vida real [26].

Mais tarde esta equipa desenvolveu um TEG para servir de fonte portátil de energia para um oxímetro de pulso num dedo, Figura 16. O TEG gerou energia (~100  $\mu$ W) suficiente para operar o dispositivo com uma atualização de medição a cada 15s, o que consumiu ~60  $\mu$ W. Cerca de metade da energia consumida foi utilizada para o processamento do sinal, aproximadamente 20  $\mu$ W foram usados por 2 LEDs e apenas cerca de 3  $\mu$ W foi utilizado para a transmissão rádio [27].

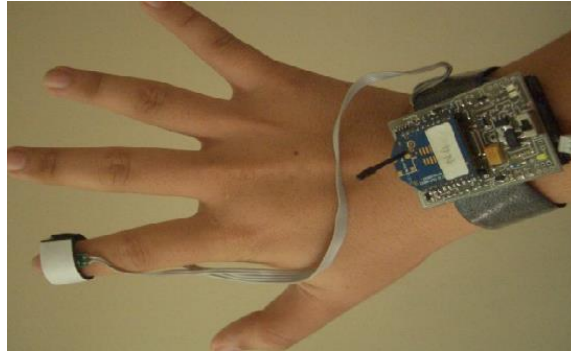


Figura 16 - Oxímetro de pulso alimentado por um TEG [27].

### 3.2.2 Rede de Geradores termoeletrônicos para alimentação de dispositivos eletrônicos

Para demonstrar a possibilidade de criação de dispositivos wireless sem bateria mais complexos, foi criado um sistema de eletroencefalografia de dois canais (EEG) alimentado por TEGs, Figura 17. Como o consumo de energia foi muito maior (0,8 mW), foram utilizadas 10 unidades de TEGs para aumentar a área de superfície em contato com a testa do usuário (~ 64 cm<sup>2</sup>) com elementos de 1 a 1,3 cm de espessura em cada um. A potência medida a 22 ° C, temperatura ambiente, era de cerca de 2,5 mW, resultando numa densidade de potência de 30 μW/cm<sup>2</sup> [28].



Figura 17 - sistema de eletroencefalografia de dois canais (EEG) alimentado por TEGs [28].

A espessura dos radiadores foi aumentada, em comparação com os TEGs de pulso, para aumentar a potência por unidade de área da pele. O TEG tem uma espessura de 29 mm. O tamanho da placa quente é de 4 cm x 20 cm com uma área de contato com a pele de 64 cm<sup>2</sup>. A potência medida a 22°C é de cerca de 2,5 mW ou 30 mW/cm. O sistema foi projetado para uso em ambientes fechados a 21–26 °C. A uma temperatura abaixo de 18–19 °C, o fluxo de calor através do TEG aumenta e o dispositivo é considerado pelos usuários como muito frio. A uma temperatura de 19°C, a potência aumenta para 3,7mW. Portanto, para torná-lo utilizável para uso externo em baixas temperaturas ambientes, o fluxo de calor deve ser diminuído, ou seja, os radiadores

devem ser menores. Como resultado, em altas temperaturas ambientes, o TEG não produziria energia suficiente e o seu tamanho aumentaria ainda mais. Portanto, neste tipo de TEG, e para tornar aceitável a sua utilização a baixas temperaturas ambientes, poder-se-ão adicionar células fotovoltaicas. Num dispositivo com dimensões fixas, elas compensam a falta de energia do TEG a altas temperaturas. Além disso, as células fotovoltaicas são mais eficientes ao ar livre e podem obter uma energia significativa para ser armazenada numa bateria.

Posteriormente foi desenvolvido um sistema eletrocardiográfico onde foram usados TEGs integrados na roupa do paciente para realizar um monitoramento eletrocardiográfico (ECG). Um total de 14 TEGs de  $3 \times 4 \text{ cm}^2$  de área e 6,5 mm de espessura foram distribuídos numa camisa clássica para gerar um total de  $0,8 \sim 1 \text{ mW}$  com correspondência de carga de 1 V. Durante as atividades de escritório do usuário o sistema de ECG consumia  $0,44 \sim 0,5 \text{ mW}$ . Este sistema de ECG possuía uma bateria secundária que era constantemente recarregada durante a operação para compensar a geração irregular de energia dos TEGs distribuídos [26].

Mais tarde, este sistema foi otimizado ao serem utilizados 16 TEGs de  $8 \times 9 \text{ mm}^2$  de área e 5 mm de espessura (com uma placa quente de 3 cm de diâmetro e uma placa fria de  $4 \times 3 \text{ cm}^2$  de área e 1 mm de espessura para cada TEG) foram integrados numa camisa no lado da frente do corpo, gerando com sucesso  $0,5 \sim 5 \text{ mW}$  à temperatura ambiente de  $27 \sim 15 \text{ }^\circ\text{C}$ , respetivamente durante as atividades habituais do escritório[26]. Este sistema melhorado pode ser observado na Figura 18.



Figura 18 – Sistema de eletrocardiógrafo alimentado por 16 TEGs [26].

## **Capítulo 4 - Fatores de otimização de um gerador termoeletrico alimentado pelo calor corporal humano**

A eficiência de um gerador termoeletrico alimentado pelo calor corporal humano pode ser bastante variável dependendo de determinados fatores. Na literatura é possível encontramos inúmeros estudos onde TEGs com diferentes composições e estruturas foram aplicados em diversas áreas. Dentro dos fatores que podem levar a uma alteração da eficiência dos TEGs destacam-se a sua dimensão, a composição que constitui o seu circuito, as zonas do corpo onde este pode ser aplicado, assim como a temperatura ambiente no momento da sua utilização.

Existem duas formas básicas de maximizar a potência gerada por um TEG. A primeira maneira é fazer um TEG fino, digamos, com 3 mm de espessura, e fornecer um bom isolamento térmico entre as placas do TEG. Duas placas maiores que a área ocupada pela termopilha são necessárias para diminuir a resistência térmica do gerador térmico e para obter uma ótima diferença de temperatura na termopilha. Devido à fragilidade dos materiais termoeletricos, o dispositivo deve ser aplicado usando suportes rígidos, como pilares ou uma parede de encapsulamento, colocados entre as placas. Posteriormente, o preenchimento desse TEG com material com condutividade térmica menor que a do ar pode ser vantajoso para diminuir ainda mais a troca de calor parasita entre as placas.

A segunda forma de maximizar a potência é diminuir a resistência térmica do gerador térmico. Isso pode ser feito usando um dissipador térmico (de barbatana ou de pinos). Obviamente, esse dissipador térmico ocupa algum volume do TEG. Logo, consequentemente este dispositivo não pode, portanto, ser fino. No entanto, num TEG com espessura de 1-2 cm, o dissipador térmico ajuda a aumentar ainda mais o fator  $N$  e a potência.

### **4.1 Relação entre as dimensões de um TEG e a potência gerada**

Podemos encontrar vários tipos de geradores termoeletricos produzidos para diferentes propósitos, dependendo das gamas de energia que se pretendem obter. Na Tabela 2 podemos observar que a aplicação de TEGs vai desde o uso em dispositivos de dimensões reduzidas, Thin film TEGs, que produzem energia na ordem dos microwatts ( $\mu W$ ) até níveis industriais, onde estes apresentam grandes dimensões gerando potências na ordem dos watts (W).



Tabela 2 – Gamas de potência gerada por diferentes tipos de TEGs [29].

Tipo de TEG	Gama de potência Gerada	Usos
TEGs grandes	$>W$	Uso em massa para fins industriais
TEGs pequenos	$\approx mW$	GPS, dispositivos de rastreamento, biossensores
Micro TEGs	$< mW$ to $\mu W$	Dispositivos micro eletromecânicos (MEMS)
“Thin film” TEGs	$\approx \mu W$	Combina substrato flexível com geração em microescala

Podemos confirmar ao observar a Tabela 2 que quanto maior for o gerador termoelétrico maior vai ser a potência gerada por este.

Leonov et al. [26] realizaram um estudo onde observaram a variação da resistência térmica, da diferença de temperatura, e por fim da potência obtida ao variar a espessura do gerador termoelétrico.

Para este estudo foi utilizado um gerador termoelétrico de 3cm de diâmetro, onde o espaço vazio entre as placas de metal rígido, com 1mm de espessura cada uma, foi preenchido com ar. A espessura das placas conferiu rigidez e boa condutibilidade térmica da pele humana à termopilha e desta última ao ar ambiente. Os cálculos foram realizados para a distância entre as placas de 0,5 a 8 mm, para que a espessura do TEG variasse de 2,5 a 10 mm. Os restantes parâmetros foram: temperatura do ar de 22 ° C, temperatura corporal do indivíduo 37 ° C, resistência térmica do corpo de 250 cm<sup>2</sup>K/W,  $Z = 0,003 K^{-1}$ , resistência térmica dos suportes e do encapsulamento com de 400 K/W por 1 mm de distância entre as placas, coeficiente de emissão da superfície externa do TEG de 90%. Ainda, assegurou-se que não ocorreram quaisquer transferências de calor por radiação entre as placas de alumínio polido e por convecção dentro do TEG. Os resultados do experimentais podem ser observados na Figura 19.

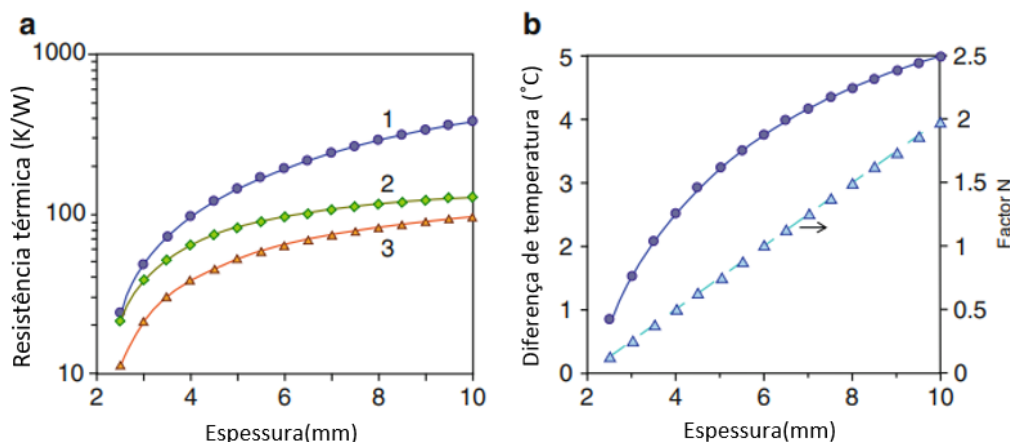


Figura 19 – Análise da dependência das características térmicas tanto do gerador termoelétrico quanto da termopilha com a espessura de um TEG: (a) a resistência térmica ideal de um TEG em vazio (1), do TEG correspondente (2) e da termopilha (3) e (b) a diferença de temperatura numa termopilha (1) e o fator N (2) [26].

Os resultados da modelação mostram que a resistência térmica de um TEG vazio aumenta com sua espessura (Figura 19 (a)).

Idealmente, um dispositivo wearable e a sua fonte de alimentação devem ser pequenos. Portanto, a energia produzida por unidade de volume de um TEG é de grande importância. Nas condições especificadas acima, ele atinge um máximo num dispositivo com espessura de 4-5 mm (Figura 20). A potência absoluta produzida num dispositivo mais grosso aumenta (Figura 20) apesar de o volume aumentar mais rapidamente do que a potência. A característica da figura mostra que o aumento da espessura de 2,5 para 6 mm causa um aumento da potência. Portanto, um segundo dispositivo foi utilizado onde não existia grade de proteção. Então, a única diferença relativamente ao primeiro dispositivo é que uma parte do seu volume é ocupada por um dissipador térmico. Os resultados obtidos com essa topologia também são mostrados na Figura 20. O tamanho do dissipador térmico aumenta até 40% o volume do dispositivo num TEG de 10 mm de espessura. Permite manter a produção máxima de energia independente do volume (Figura 19 (a)). Portanto, a energia gerada por esse TEG aumenta linearmente pelo menos até 10 mm de espessura.

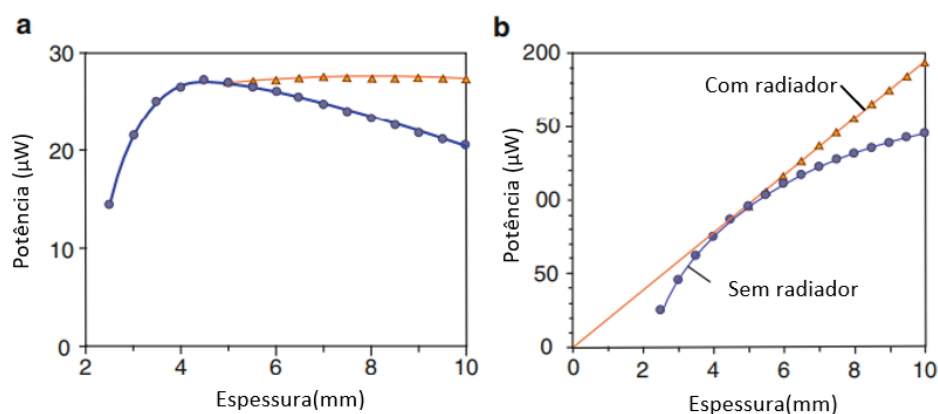


Figura 20 - Relação entre a potência e a espessura de um TEG ideal sem radiador (círculos) e com o radiador de tamanho ideal (triângulos): (a) potência por unidade de volume, (b) potência produzida num TEG de 3 cm de diâmetro [26].

Não se deve esperar um aumento linear da potência em dispositivos com espessura superior a 1 cm. Na verdade, nesses dispositivos, os outros efeitos que foram negligenciados na modelação acima começam a ser importantes. A aplicação do dissipador térmico resulta num aumento local do fluxo de calor no corpo humano. Quanto maior o radiador dissipador térmico, maior o fluxo de calor e menor a temperatura da pele sob o TEG. A temperatura do dissipador térmico diminui abaixo da temperatura da superfície externa de um indivíduo vestido. Portanto, a transferência de calor torna-se menos eficaz do que se supunha no modelo. Podemos concluir da Figura 20 que um TEG pequeno e otimizado pode ser usado para produzir cerca de  $25 \mu\text{W}/\text{cm}^2$  em ambientes fechados, ou seja, sem vento, sem luz solar, sem peças de roupa usadas em cima do TEG e numa localização no corpo humano onde a resistência térmica seja de  $250 \text{ cm}^2 \text{ K}/\text{W}$ .

Caso o TEG se encontre localizado numa superfície descoberta da pele, a temperatura do dissipador térmico será significativamente menor que a temperatura da pele. Consequentemente, a potência por unidade de volume diminui em comparação com os cálculos realizados nesta seção, devido à temperatura mais alta da camada de



convecção formada ao redor do corpo humano. Com base nos resultados teóricos e práticos, concluímos que um TEG discreto e projetado corretamente no local correto do corpo humano pode produzir em média aproximadamente 10 a 30 mW/cm<sup>2</sup> de energia elétrica, em clima moderado, em 24h. A potência produzida depende da espessura de um TEG e de seu tamanho: quanto mais espesso o TEG, melhor é a geração de energia, enquanto que quanto maior a área do TEG, menos energia por unidade de área é produzida. Também depende muito da localização do ser humano, portanto, este último requer atenção especial.

## 4.2 Influência da temperatura ambiente na potência gerada pelo TEG

Quando se pretende desenvolver um gerador termoelétrico, um dos fatores importantes, que tem de se ter em consideração, é a temperatura ambiente e a exposição da face fria do gerador.

Geralmente, os estudos sobre os fluxos de calor e a condutância térmica são realizados por todo o corpo humano, maioritariamente na superfície da pele nua, isto porque as roupas alteram o fluxo global de calor do corpo humano, influenciando a transferência de calor do corpo a temperaturas ambientes inferiores a 25-28 °C. Os três canais principais de perda de calor são por: convecção, radiação e evaporação da superfície da pele, são afetados pelas roupas. Podemos também concluir que quanto mais baixa a temperatura ambiente, maior é a percentagem de calor dissipado da pele exposta, tal como a cara e as mãos [30, 31].

Leonov et al. [33] analisaram também a influência da temperatura ambiente na produção de energia elétrica através de um TEG, tendo obtido os resultados que podemos observar na Figura 21.

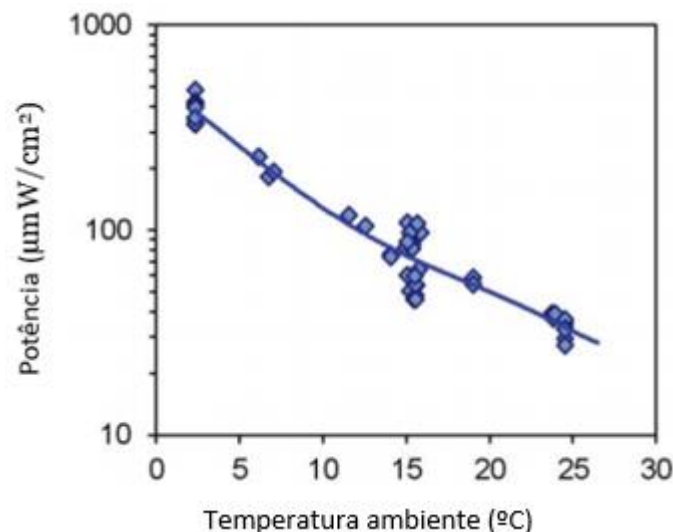


Figura 21 – Dependência da potência, por área, gerada por um TEG, relativamente à mudança de temperatura ambiente [33].

Para obter o gráfico da Figura 21 foi utilizado um TEG com um dissipador de calor de 3 x 3 x 1.5 cm. Podemos observar que o aumento da temperatura ambiente fez com que a diferença de temperatura entre as faces quente e fria diminuísse, o que leva a um decréscimo da potência obtida. Concluímos assim que a potência máxima pode ser obtida a baixas temperaturas ambiente, onde a diferença de temperatura entre as faces quente e fria é maior [33].

### 4.3 Relação entre a zona de aplicação do TEG e a potência gerada

A zona onde os TEGs são colocados sob a superfície da pele é crucial para que a sua eficiência atinja o valor máximo. Posto isto, quando se pretende alimentar um dispositivo eletrónico através de um TEG é necessário estudar as possíveis zonas onde este pode ser aplicado a fim de obter o melhor rendimento.

Num estudo desenvolvido por Leonov V. podemos observar um mapa da temperatura da mão, mostrando essa temperatura em diferentes áreas, que diferem entre si pelo fato de existirem artérias e vasos sanguíneos em determinadas zonas, tal como podemos observar na Figura 22 [26].

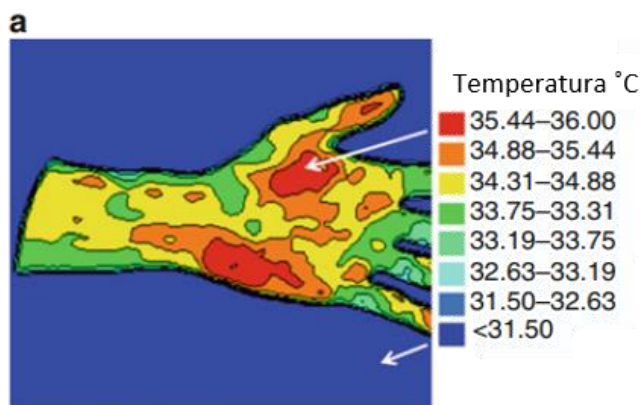


Figura 22 – Mapa da temperatura da mão [26].

Para além do estudo da temperatura da mão foi também realizado um estudo com o objetivo de analisar as diferentes temperaturas que podem ser medidas na zona do pulso, observando assim a influência destas na colocação do TEG e posterior obtenção de energia. Os resultados deste estudo são apresentados na Figura 23 enquanto que na Figura 24 podemos observar as artérias da mão e do pulso.

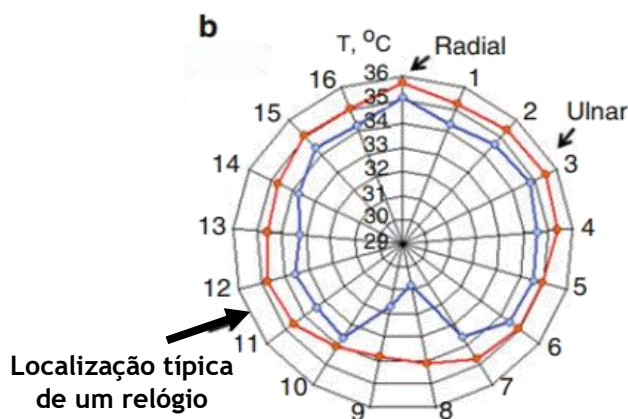


Figura 23 – Mapa da temperatura do pulso, 27°C (a vermelho) e 22,3°C (a azul), medidos em ambientes fechados, editado de [26].

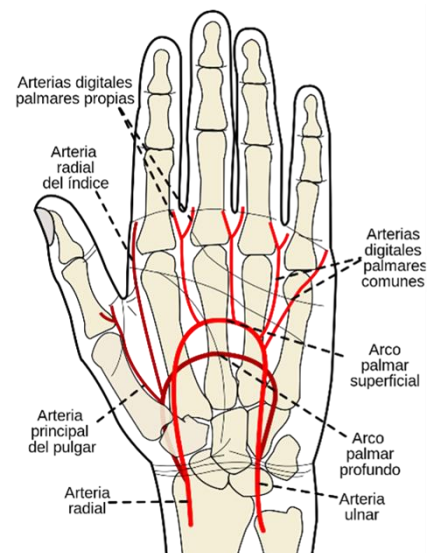


Figura 24 – Representação das artérias da mão e pulso, editado de [26].

Analisando os estudos esquematizados na Figura 23 concluímos que a temperatura medida na zona do pulso vai ser maior sob as artérias ulnar e radial e que, consequentemente, significa que o TEG consegue gerar uma maior potência sobre essas zonas. Verificamos também, como já tinha sido abordado anteriormente, que quanto maior a temperatura ambiente maior será a temperatura medida na pele.

Uma outra pesquisa, realizada por H. Wong e Z. Dahari, foi feita com o intuito de estudar a captação de energia a partir do calor humano nomeadamente, através do calor residual humano.

Este trabalho de investigação foi baseado na eletricidade produzida pelo efeito de Seebeck em diferentes partes do corpo humano. Os autores do trabalho avaliaram a possibilidade de produção de energia em cinco áreas, nomeadamente a palma da mão, a parte superior da mão, o interior do pulso, a parte superior do pulso e a perna. Ao sistema aplicou-se um circuito para elevação da tensão, aumentando o rendimento energético da energia térmica extraída do corpo humano [34].

Cada medição para os diferentes locais foi realizada por três vezes, usando um termómetro de cristal líquido, no mesmo indivíduo de modo a obter a média dos valores. Ainda, a obtenção dos resultados foi conseguida em duas fases, nomeadamente, a fase de simulação e a fase experimental, permitindo a comparação de resultados.

Na Tabela 3 podemos verificar ambos os resultados obtidos na atividade experimental.

Tabela 3- Representação dos resultados experimentais. Tabela adaptada de [33].

Partes do Corpo Humano	Temperatura (°C)	Potência do LED (mW)
Perna	35,5	9,8
Parte superior do pulso	36	22,7
Pulso	37	23,6
Parte superior da palma da mão	37,5	24,1
Palma da mão	38	24,7

Concluimos ao analisar a Tabela 3 que as temperaturas medidas à superfície da pele variaram entre 35.5 °C e 38 °C, sendo que, das zonas analisadas, a palma da mão foi aquela para a qual se verificou uma maior temperatura, o que se refletiu numa maior obtenção de potência no LED usado para o teste, o que significa que nesta parte do corpo um TEG consegue gerar mais energia que nas restantes zonas [33].

#### 4.4 Influência da utilização indoor/outdoor na potência gerada pelo TEG

Uma pesquisa feita por Leonov et al. [26], comprovou-se a influência da utilização de um TEG indoor ou outdoor na potência obtida. Foi realizado um ensaio prático com um TEG a 20–22 °C em ambientes fechados, tendo o TEG produzido 200–300 mW a uma tensão de circuito aberto de 2 V. Essa potência diminui para cerca de 100–150 mW à noite ou quando o indivíduo estava em repouso por um longo período, ou seja, em baixa taxa metabólica.

No entanto, com alguns minutos de caminhada em ambientes fechados, a potência aumentou para 500-700 mW. Esse aumento é explicado pela convecção de ar forçado numa pessoa em andamento. Pelo mesmo motivo, ou seja, devido ao vento e a mais atividades físicas, concluimos que os TEGs wearable funcionam melhor ao ar livre.

A energia gerada no escritório numa pessoa parada por um determinado tempo é mostrada na Figura 25.

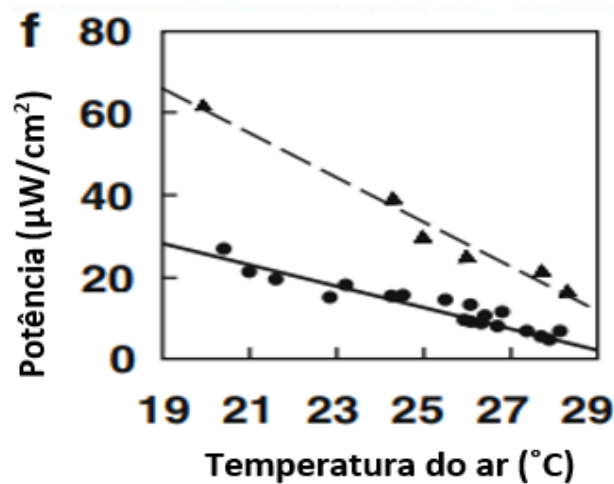


Figura 25 - Potência produzida por um TEG no escritório numa pessoa sentada (em círculos) e em andamento (triângulos) [26].

Concluimos pelo gráfico apresentado na Figura 25 que a potência gerada é inversamente proporcional ao aumento da temperatura do ar, ou seja, quanto menor a temperatura do ar maior vai ser a potência obtida. O gráfico indica-nos também que uma pessoa em movimento produz uma maior potencia que uma pessoa em repouso [26].

#### 4.5 Necessidades energéticas de alguns dispositivos eletrônicos

Para uma correta análise da eficiência de um gerador termoelétrico, é necessário também ter noção das necessidades energéticas dos dispositivos que pretendemos alimentar, o que facilita o nosso trabalho pois sabendo a quantidade de potência que determinado dispositivo necessita para a sua alimentação, apenas temos de fabricar um TEG que consigo obter tal potência.

Na Tabela 4 observamos exemplos das necessidades energéticas de alguns dispositivos [35].

Tabela 4- Necessidades energéticas de alguns dispositivos eletrônicos [35].

<b>Dispositivo eletrônico</b>	<b>Potência média necessária</b>	<b>Fonte de energia e tempo de vida útil</b>
Pacemaker e cardioversor desfibrilhador	<10 $\mu$ W	10 anos de tempo de vida
Aparelho auditivo	100-2000 $\mu$ W	Bateria recarregável de 1 semana de vida
Processador coclear analógico	200 $\mu$ W	Bateria recarregável de 1 semana de vida
Gravador Neuronal	1-10 mW	Energia indutiva
Estimulador de retina	250 mW	Energia indutiva
Relógio de pulso (quartzo / digital)	5 $\mu$ W	5 anos de tempo de vida
GPS de pulso	1.5-10 mW	-----
Sistema de eletrografia wireless	0.4 mW	
Redes de sensores wireless	100 $\mu$ W	-----

#### 4.6 Influência da resistência térmica e do fluxo de calor na potência gerada pelo TEG

Leonov V. realizou dois ensaios para demonstrar a importância da resistência térmica do corpo. No primeiro ensaio, as medidas comparativas foram realizadas em três locais: na testa, no pulso (na artéria radial) e no peito (lado esquerdo, nas costelas mais baixas). Um TEG com um tamanho de 3 cm x 4 cm x 0,65 cm e com uma resistência térmica de 580  $\text{cm}^2\text{K/W}$  foi usado nesta experiência. O fluxo de calor a 22,8°C foi o mesmo, porém a temperatura da pele foi diferente, de 33,8 °C no punho a 35,8°C na testa. A resistência térmica do corpo correspondente variou de um local para outro por um fator de três. O mesmo TEG também foi integrado sequencialmente em nove locais da camisa (Figura 26 (b)). A resistência térmica correspondente sofre grandes variações (Figura 26 (c)). Portanto, a geração de energia varia dentro de um fator de três nos nove locais considerados [26,28].

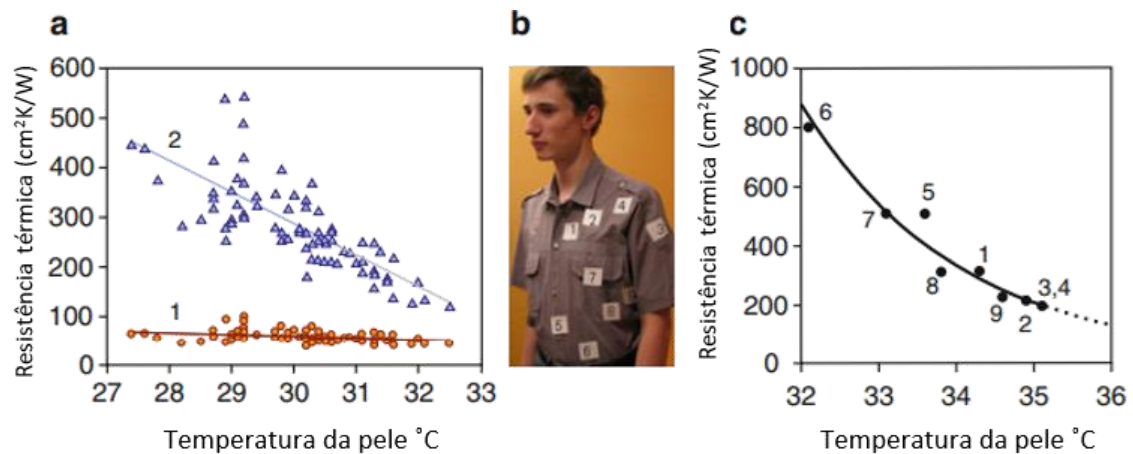


Figura 26 - (a) Resistência térmica estimada por centímetro quadrado da pele medida em  $22,7 \pm 0,5^{\circ}\text{C}$  no pulso de 77 pessoas sob o TEG anexado: (1) é a resistência térmica entre o núcleo do corpo e o sangue arterial no pulso, (2) é a resistência térmica entre o sangue arterial e o TEG. (b) Nove locais onde a resistência térmica do ser humano foi medida; e (c) é a resistência térmica do corpo humano a  $23^{\circ}\text{C}$ , dependendo da sua localização no tronco [28].

Observamos pela Figura 26 (a) que a resistência térmica entre o sangue arterial e o TEG diminui com o aumento da temperatura, enquanto que a resistência térmica entre o núcleo do corpo e o sangue arterial no pulso se mantém constante. Resultados esses que se confirmam na Figura 26 (c) onde mais uma vez observamos a diminuição da resistência térmica com o aumento da temperatura da pele.

No segundo ensaio, foi estudada a capacidade de o ser humano fornecer grande fluxo de calor. Uma termopilha com resistência térmica de  $50 \text{ cm}^2\text{K/W}$  foi acoplada ao pulso em dois locais, na artéria radial e na localização típica de um relógio. Um grande pedaço de alumínio mantido à temperatura ambiente foi colocado no lado externo da termopilha e serviu como um dissipador de calor quase perfeito. O ensaio mostra que, na artéria radial, um fluxo de calor de  $90 \text{ mW/cm}^2$  excede num fator de três o fluxo de calor que o ser humano pode fornecer no local de um relógio. No entanto, em aplicações em espaços fechados, o fluxo de calor superior a  $15\text{-}30 \text{ mW/cm}^2$ , dependendo da localização de um TEG, causa sensação de frio. Portanto, um fluxo de calor aceitável de  $10$  a  $20 \text{ mW/cm}^2$  através de um TEG wearable fornecido com um dissipador térmico é o máximo admitido em ambientes fechados.

#### 4.7 Colocação de um TEG numa peça de roupa

Outro fator igualmente importante que devemos ter em conta ao abordar os fatores de otimização dos parâmetros de saída de um TEG é a forma de fixar o sistema ao nosso corpo. Para que seja mais cómodo para o utilizador, e para que este o possa utilizar de forma discreta sem que atrapalhe as suas atividades diárias, os TEGs podem ser fixados a peças de roupa sem perderem a sua eficiência de produção de energia.

Leonov et al. [33] investigou formas de integrar um TEG numa peça de roupa. O TEG tinha uma face quente redonda de 3 cm de diâmetro, uma termopilha de 5 mm de espessura com 256 termopares de BiTe, e uma placa fria com dimensões de  $40 \times 30 \times 1$  mm. A espessura do TEH era de 6,5 mm. A termopilha foi encapsulada com polietileno de 0,2 mm de espessura. Para proteção contra choques, quatro pilares termicamente isolantes de 1 mm de diâmetro foram colocados entre as placas de TEG, Figura 27.

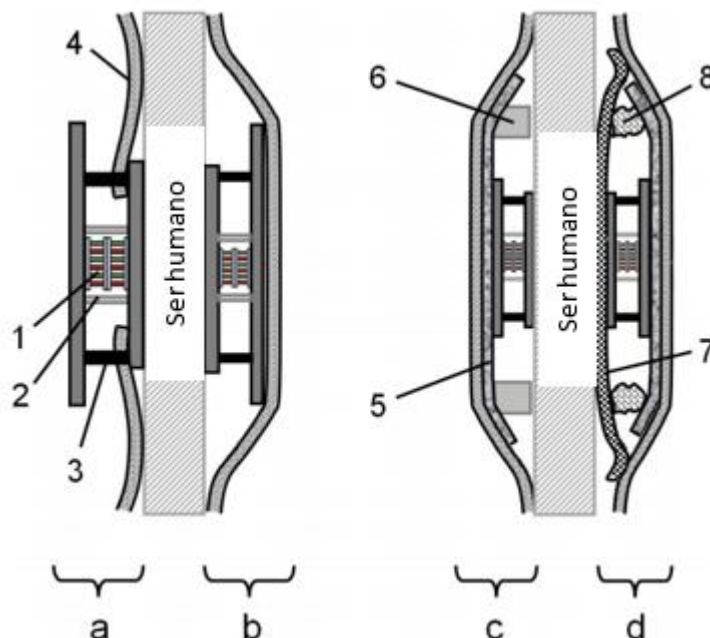


Figura 27 – (a) - (d) 4 formas de integrar o TEG numa peça de roupa. Os números representam: (1) termopilha, (2) encapsulamento de polietileno, (3) espaçadores de isolamento térmico, (4) têxtil, (5) uma camada de espalhamento de calor de tecido de carbono, (6) espaçadores de espuma de neopreno, (7) camada de têxtil adicional e (8) espaçadores à base de algodão. (a) TEG passa pelo orifício feito no tecido. (b) TEG é colocado sob a camada têxtil. (c) A camada de dissipação de calor é colada à placa fria e ao algodão, enquanto espaçadores de espuma permitem manter alguma distância entre a camada de espalhamento de calor e a pele. (d) Camada adicional de algodão é colada ao TEG e costurada dentro da roupa [33].

Na primeira forma de integração do TEG, a placa quente foi colocada em contato direto com a pele sob um têxtil, enquanto a placa fria estava a cerca de 4 mm da camada de algodão. Esta forma de integração apresenta um comportamento mais eficiente neste esquema, sendo que ambos os lados participam da troca de calor com o ar ambiente. O aparecimento de placas de metal em uma peça de roupa acaba por não ser a solução mais atraente do mercado.

Na segunda forma de integração, o TEG foi apenas colocado entre o algodão de uma camisa e a pele. O dispositivo foi preso ao peito com um elástico a cerca de 10–12 cm abaixo do queixo. Em seguida, as medições comparativas foram realizadas no escritório para três posições de colocação do algodão: 1) apertado contra a placa fria, 2) algodão puxado do TEG para fazer um intervalo de ar de cerca de 5–10 mm entre a placa fria e o algodão, e 3) o algodão foi puxado um pouco para a esquerda e para a direita deixando o TEG completamente exposto ao ar. Os resultados da produção de energia para os 3 casos são mostrados na Figura 28.



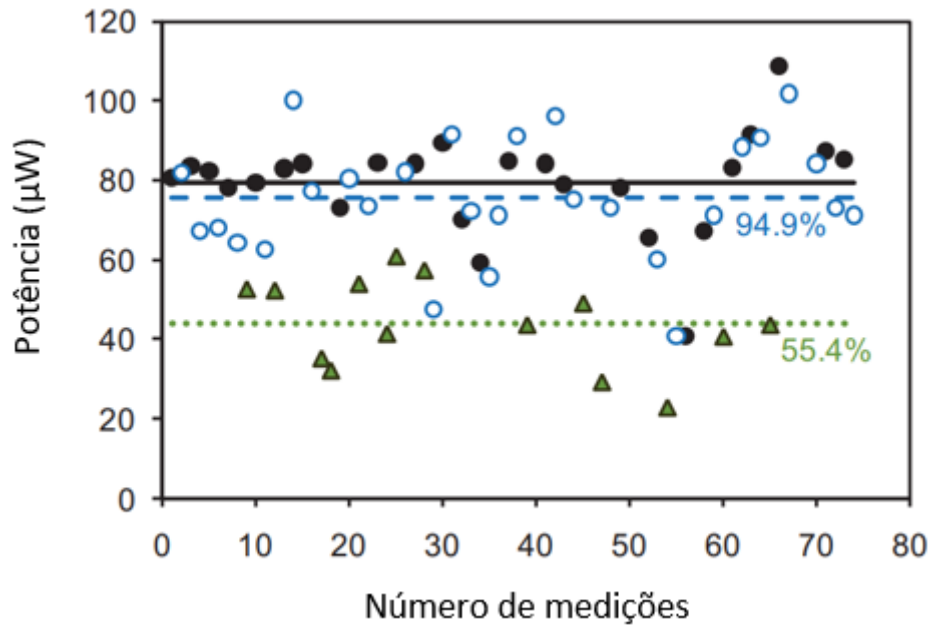


Figura 28 – Resultados da obtenção de energia nos casos 1-3). Comparado com o TEG exposto ao ar ambiente (círculos fechados; correspondem à Figura 27 (a), a potência diminui apenas ligeiramente se o TEG for colocado sob o algodão (círculos abertos; correspondem à Figura 27 (b), mas diminui para metade dele se for observado espaço de ar entre o algodão e a placa fria (triângulos). As linhas horizontais marcam os níveis médios correspondentes.

Os resultados mostrados na Figura 28 fornecem quase a mesma média de potência (cerca de 95%) nos casos 1) e 3). O espaço de ar entre o TEG e o algodão, caso 2), resultou na pior obtenção de energia, apenas cerca de metade da energia em comparação com os casos 1) e 3). Portanto, ocultar um TEG sob o tecido é viável com perda insignificante de energia se o algodão estiver em contato com a placa fria. O algodão atua como o radiador do TEG.

No caso da terceira integração, foi colocado um pedaço de tecido de carbono dentro de uma camisa de algodão, e a face fria de TEG foi colada em tecido de carbono, Figura 27 (c). Medições comparativas feitas em simultâneo em dois TEGs, Figura 27 (b) e Figura 27 (c), mostraram um aumento de 30% na potência devido à camada de espalhamento de calor feita de tecido de carbono. Posteriormente, uma outra camada têxtil foi adicionada ao sistema, Figura 27 (d). Ela diminui ligeiramente a potência devido à sua resistência térmica, mas torna o TEG completamente oculto entre as duas camadas de algodão e confortável para o usuário [33].

## **4.8 Análise geral das condições de otimização de um TEG**

Após a análise dos fatores que influenciam a eficiência de um gerador termoelétrico, chegamos à conclusão de que as condições ótimas para a obtenção de energia através da temperatura corporal ocorrem utilizando um TEG com dissipador térmico com 4-5 mm de espessura, a temperaturas inferiores a 20°C, que o TEG deverá ser colocado na zona do pulso e sob as artérias radial ou ulnar, e que é possível obter uma maior potência fazendo a recolha de energia ao ar livre e enquanto se caminha. Para potenciar a energia obtida deve ser utilizado um conversor para aumento de tensão à saída no circuito.

## Capítulo 5 – Estudo experimental

Este capítulo tem como objetivo a descrição do procedimento experimental, da metodologia de ensaio e do equipamento usado neste trabalho dissertativo para a otimização, aplicação e caracterização de um módulo termoeétrico para a produção de energia elétrica, baseado na disponibilização da energia térmica do corpo humano, quando existe um gradiente em relação à temperatura ambiente.

O capítulo inicia-se com a apresentação da componente experimental, nomeadamente a apresentação do software utilizado para as simulações, o seu modo de funcionamento, bem como a sua comparação com outros métodos e softwares semelhantes.

Desse modo, pretende-se esclarecer todo o procedimento experimental efetuado como meio para a caracterização do módulo termoeétrico através de diversas simulações, resultando na obtenção e apresentação de resultados.

### 5.1 Componente experimental

Nesta secção é feita a apresentação da componente experimental utilizada no âmbito do presente trabalho dissertativo. Nesse contexto, será descrito o software utilizado durante todo o procedimento experimental, nomeadamente uma aplicação desenvolvida em linguagem de programação Matlab, que simula um gerador termoeétrico, o que nos permite obter diversos resultados de saída através de prévia alteração dos parâmetros de entrada. Este procedimento prático permite fazer as simulações num curto espaço de tempo, o que para a caracterização e estudo da otimização de um TEG é uma vantagem fundamental.

Nesta secção serão também abordados outros métodos de simulação do funcionamento de um TEG, precisamente para justificar o motivo da utilização deste software em comparação com outros semelhantes utilizados para o mesmo efeito.

#### 5.1.1 Métodos utilizados para a simulação de um gerador termoeétrico

O desempenho de um módulo termoeétrico depende de vários parâmetros e a correta avaliação e simulação desses desempenhos é fundamental tanto no desenvolvimento dos módulos quanto na sua aplicação em um sistema completo. Neste sentido, a modelação numérica pode ajudar a encontrar e otimizar parâmetros críticos.

A maioria dos elementos passivos ou secundários afetam a potência real de saída e a eficiência do sistema, pelo que negligenciar as resistências térmicas desses elementos

pode levar a uma severa superestimação de parâmetros como potencial de circuito aberto,  $V_{OC}$ , potência e eficiência.

Enquanto geralmente conhecemos as temperaturas externas do lado frio e do lado quente do TEG,  $T_c$  e  $T_h$  respetivamente, desconhecemos as temperaturas reais nas junções dos elementos termoelétrico (TEs) representadas por  $T_c^*$  e  $T_h^*$ . Estas temperaturas diferem devido às quedas de temperatura  $\delta T_c$  e  $\delta T_h$ , que ocorrem através das camadas térmicas dentro e fora do TEM, assim:

$$T_h^* = T_h - \delta T_h \text{ e } T_c^* = T_c + \delta T_c \quad (5.1)$$

$T_c^*$  e  $T_h^*$  dependem do fluxo de calor que por sua vez depende das propriedades do material dependentes da temperatura,  $\alpha(T)$ ,  $\kappa(T)$  e  $\rho(T)$ , e da corrente elétrica  $I$ . A resistência de carga não pode ser considerada constante sendo que afeta a corrente e por sua vez o comportamento térmico [36].

Para resolver os problemas de negligenciar os parâmetros foram desenvolvidos modelos para incluir resistências térmicas e outros efeitos secundários no sistema TEG.

Gomez et al. [37] desenvolveram um modelo utilizando 12 coeficientes e duas equações não lineares para observar a resistência da carga. O objetivo foi considerar as resistências térmicas dos elementos passivos e a variação da temperatura com relação à resistência de carga.

Huang et al. [38] criaram um modelo desenvolvido para encontrar a forma mais eficiente de aumentar a potência gerada por um TEG, baseando-se numa equação cúbica para avaliar a diferença de temperatura nas junções dos TEs e utilizando as propriedades constantes dos materiais. O modelo tinha em conta a geometria do TE, a resistência de contato elétrico, as perdas térmicas e a resistência de contacto térmico. A resistência térmica de contato é levada em consideração usando o coeficiente Seebeck efetivo. Para o TEG investigado, a potência experimental gerada foi consistente com o cálculo do modelo; o desvio relativo foi de 10%. O modelo foi usado para determinar qual variável tem o maior efeito na energia gerada. A escolha depende das limitações de um sistema, do custo e do ambiente específico.

Foi também desenvolvido um modelo de análise numérica baseado no método de elementos finitos (FEM) que permite a avaliação de perdas térmicas com boa precisão, exigindo, contudo, um longo tempo computacional. Em particular, a obtenção de uma solução paramétrica para o sistema TEG completo não é fácil de ser implementado. A análise numérica do FEM foi implementada tanto no software ANSYS [38] como no software COMSOL [39].

Outra ferramenta também amplamente utilizada para simulação e análise do comportamento de um sistema TEG é o software Matlab, nomeadamente a ferramenta de modelagem Simulink. O Matlab foi anteriormente utilizado para desenvolver modelos e interfaces para sistema fotovoltaico ou termoelétrico [40]. Tsai et al. [41] desenvolveram igualmente um modelo em Matlab/Simulink, mas sem levar em conta a dependência das propriedades do material com a temperatura nem a temperatura real dos elementos. Já Kane et al. [42] desenvolveram um modelo de domínio espacial

Simulink sem levar em consideração a cerâmica e as camadas térmicas passivas, o que também vai negligenciar os parâmetros de saída.

### **5.1.2 Software utilizado no estudo experimental**

Para o desenvolvimento do estudo experimental foi utilizado um modelo interativo desenvolvido através do software Matlab, proposto em [36]. O modelo, de simples operação, resolve equações básicas levando em consideração as perdas de temperatura devido a elementos passivos térmicos e elétricos e as propriedades dependentes da temperatura. Posteriormente são calculadas as temperaturas ideais nos elementos termoelétricos (TE). O modelo tem em consideração os efeitos de Joule e Peltier e o aquecimento de Thomson e a resistência de carga é obtida com a resistência interna real.

Comparativamente aos modelos apresentados da subsecção 5.1.1, o modelo utilizado no estudo experimental evita a criação de um modelo complexo e a necessidade de discretização do domínio, tal não acontece nos modelos de análise por elementos finitos (FEMs). Apresenta também como principais vantagens permitir uma fácil implementação e modificação, considerando também a transferência de calor entre camadas externas e internas, e permite uma execução rápida, o que para simulações paramétricas e numa abordagem de otimização é ideal [36].

Desse modo, o principal objetivo deste trabalho é analisar e detetar quais os parâmetros que têm uma maior influência na eficiência de um TEG e na potência máxima que este consegue gerar, para assim podermos quantificar e/ou qualificar os parâmetros ideais de um TEG. Assim, no futuro, para o desenvolvimento de um TEG físico a construção de tal sistema fica facilitada, uma vez que, através dos resultados das simulações, já conhecemos os materiais e condições ideais para o fabrico desse mesmo sistema. Isto permite-nos no futuro não só poupar tempo como evitar o desperdício de materiais.

A aplicação criada em Matlab facilita a obtenção de resultados e a sua posterior análise. Para a realização do procedimento experimental, utilizando o software desenvolvido por Ferrario et.al [36], é necessário inicialmente colocar os parâmetros de entrada do TEG que pretendemos simular. Tal como foi abordado na subsecção 5.1.3, o simulador permite-nos escolher os parâmetros geométricos, os parâmetros dependentes da temperatura, assim como os elementos parasitas. Para melhor análise o simulador está dividido em cinco janelas: geometria e temperaturas do módulo, propriedades termoelétricas, elementos passivos e perdas de temperatura, desempenho de carga e fluxo e, por fim, convergência e output.

Quanto aos parâmetros geométricos, na primeira janela, o simulador possui um espaço iterativo que nos permite colocar as dimensões dos termopares, da termopilha e da placa cerâmica utilizada, tal como podemos observar na Figura 29.

Thermoelectrics [mm]				
couples	n	127	$h_{TE}$	1.11
p-type	$L_{p1}$	2.8	$L_{p2}$	2.8
n-type	$L_{n1}$	2.8	$L_{n2}$	2.8
fill factor = 0.518				
Electrodes [mm]				
	$L_{e1}$	6.61	$L_{e2}$	2.8
	$h_e$	0.39		
Ceramic plates [mm]				
	$L_{c1}$	62	$L_{c2}$	62
	$h_c$	1	<input checked="" type="checkbox"/> Hot side	<input checked="" type="checkbox"/> Cold side

Figura 29 – Preenchimento dos parâmetros geométricos do TEG no simulador.

Como podemos observar na Figura 29, o simulador permite escolher as dimensões e número de termopares da termopilha, as dimensões dos elétrodos e também as dimensões da placa de cerâmica. Para não existir nenhum erro no preenchimento dos parâmetros geométricos, o simulador disponibiliza uma representação 3D de um TEG, Figura 30, que permite identificar cada dimensão do módulo. Os parâmetros possíveis de serem definidos são  $n$ , o número de termopares,  $h_{TE}$ , a altura dos termopares,  $L_{p1}$  e  $L_{p2}$ , respectivamente a largura e o comprimento dos termopares tipo-p (geralmente iguais),  $L_{n1}$  e  $L_{n2}$ , respectivamente a largura e o comprimento dos termopares tipo-n (geralmente iguais),  $h_e$ , a altura dos elétrodos de ligação,  $L_{e1}$ , a largura dos elétrodos de ligação,  $L_{e2}$ , o comprimento dos elétrodos de ligação,  $L_n$  a altura da placa de cerâmica e  $L_{c1}$  e  $L_{c1}$ , respectivamente a largura e o comprimento das placas de cerâmica (geralmente iguais). O módulo assume um fator de preenchimento de 0,516.

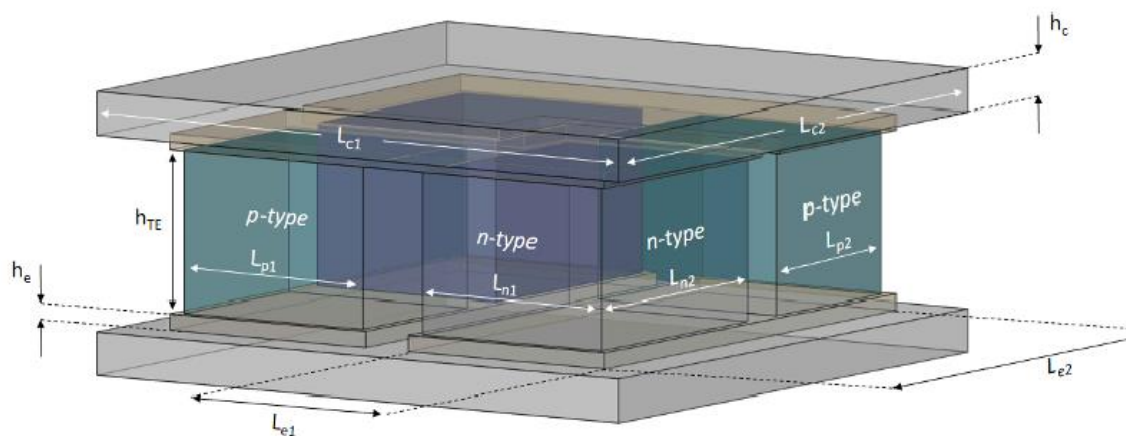


Figura 30 – Identificação das dimensões geométricas do TEG.

Após o preenchimento dos parâmetros geométricos do TEG, o simulador permite selecionar, ainda na primeira janela, as temperaturas das suas faces quente e fria. A temperatura da face fria pode variar de 0 °C a 200 °C e a temperatura da face quente pode variar de 0 °C a 800 °C.

Na segunda janela, onde se definem as propriedades termoelétricas, selecionam-se, tanto para os termopares de tipo-n como para os do tipo-p, os coeficientes polinomiais do coeficiente de Seebeck, da condutividade térmica e da condutividade elétrica desejada, consoante o material termoelétrico utilizado na simulação. Para o preenchimento destes parâmetros o simulador sugere valores padrão que correspondem a quatro materiais termoelétricos distintos, sendo eles o  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  - a, o  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  - b, o  $\text{Mg}_2\text{Si}$  e o  $\text{SiGe}$ . O utilizador também pode colocar outros valores, caso pretenda utilizar um material termoelétrico diferente dos sugeridos.

Após a definição das propriedades termoelétricas dos materiais, podem então selecionar-se na terceira janela o tipo de elementos passivos que se pretende utilizar na simulação. Para tal, é possível escolher o tipo de placa de cerâmica, já com valores padronizados para a sua condutividade térmica, entre carboneto de silício ( $\text{SiC}$ ), óxido de alumínio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), nitreto de alumínio ( $\text{AlN}$ ), ou nenhuma. Quanto aos elétrodos, são também apresentados valores padronizados para a condutividade térmica e para a condutividade elétrica, respetivamente de elétrodos de cobre ( $\text{Cu}$ ), alumínio ( $\text{Al}$ ), níquel ( $\text{Ni}$ ), ou nenhum. É possível selecionar as interfaces e decidir se estas se encontram na face fria, face quente ou em ambas. As interfaces térmicas sugeridas são solder/braze1, solder/braze2, grafite, pasta térmica e kapton. Pode ainda ser definida a resistência de contacto dos materiais de tipo-n e tipo-p.

Na quarta janela é feita uma análise do desempenho de carga e do fluxo. Primeiro podemos analisar o comportamento da potência e da tensão máxima de saída em relação ao fluxo de calor da face fria. Podemos ainda analisar o desempenho do sistema para diferentes cargas, onde podemos observar o comportamento da eficiência e da tensão de saída em relação à razão da resistência de carga,  $R_{\text{Load}}/R_{\text{TEG}}$ .

Por fim, na última janela, definem-se os parâmetros de convergência e output, onde se seleciona o número máximo de iterações bem como a tolerância em percentagem até à disponibilização do resultado. O simulador permite analisar os resultados obtidos por variação da diferença de temperatura, dependendo do número de iterações definido.

### 5.1.3 Compreensão do software utilizado no estudo experimental

Antes de serem feitas as simulações devem ser definidos os parâmetros de entrada que no caso do modelo em estudo são:

- As dimensões geométricas;
- Os parâmetros dependentes da temperatura, nos quais se incluem:
  - O coeficiente de Seebeck,  $a_{n(p)}$ ;
  - Condutividade térmica,  $\kappa_{n(p)}$ ;
  - Resistividade elétrica,  $\rho_{n(p)}$ ;
  - O elemento de cerâmica (ou passivo);

- As temperaturas externas,  $T_c$  e  $T_h$ .

O modelo considera também os elementos parasitas como os elétrodos, as resistências térmica e elétrica, a resistência de contato elétrico, a ligação e as camadas térmicas adicionais (silicone, grafite, pasta térmica).

O software utiliza um algoritmo composto por dois ciclos, o ciclo inicial e o ciclo principal, utilizando um processo de feedback para corrigir as temperaturas iniciais (externas) calculando as quedas de temperatura,  $\delta T_c$  e  $\delta T_h$ , em elementos passivos com os fluxos de calor,  $Q_{hot}$ ,  $Q_{cold}$ . Em seguida as equações termoelétricas vão sendo ajustadas com as novas temperaturas,  $T_c^*$  e  $T_h^*$ , que são as temperaturas reais nos TE depois das iterações.

Por fim, o código fornece todos os desempenhos e parâmetros de TEG tais como, o potencial de circuito aberto,  $V_{oc}$ , a corrente para a potência máxima,  $I_{max}$ , a potência máxima,  $P_{max}$  a eficiência,  $\eta$ , e a condutância térmica em função do tempo.

O ciclo inicial é necessário para determinar parâmetros iniciais de circuito aberto, como a tensão de circuito aberto, o fluxo de calor e a condutância térmica sem potência de saída. Após algumas iterações, as temperaturas fria e quente são corrigidas e usadas como uma entrada para o ciclo principal.

O primeiro bloco do ciclo principal calcula os integrais das propriedades dos materiais dependentes da temperatura,  $\alpha(T)$ ,  $\kappa(T)$  e  $\rho(T)$ , de  $T_h^*$  até  $T_c^*$ , para obter com fatores geométricos ( $A_n$ ,  $A_p$ ,  $L$ , e número de termopares,  $n$ ), a resistência do TEM,  $R_{tem}$ , a condutividade térmica,  $K_{tem}$ , a tensão de Seebeck,  $V_{tem}$ . Posteriormente, é calculada a corrente,  $I_{max}$ , nas condições máximas de potência ( $R_{load} = R_{tem}$ ), tendo em conta que  $R_{load}$  não é um valor fixo pois depende da temperatura. Consequentemente são calculados  $Q_{hot}$  e  $Q_{cold}$ , que passam a ser a entrada para a próxima iteração. Por fim, quando a convergência é verificada, podemos obter a potência máxima e a eficiência do sistema para a potência máxima.

A existência de dois ciclos serve para acelerar o processo de execução. Cada iteração contém um loop interno que elabora as equações de cada bloco, para um array de temperaturas iniciais, de  $T_c$  até  $T_h$ , o que permite traçar a caracterização completa de um TEG [36].

## 5.2 Procedimento experimental

Relativamente ao procedimento experimental, foi realizado um conjunto de simulações que tiveram como finalidade a caracterização do comportamento do TEG através da análise da quantificação das tensões de saída, da corrente elétrica, da potência e da eficiência do módulo, dependendo das diferenças de temperatura, dos parâmetros geométricos, como dimensões do TEG ou número de módulos, e tipo dos materiais passivos utilizados.

Deste modo, como um dos principais objetivos deste trabalho é avaliar as possíveis aplicações da extração da energia térmica corporal com o auxílio de geradores de energia termoelétrica (TEG) para a alimentação de dispositivos de baixo consumo energético, poder-se-á, no futuro, desenvolver TEGs físicos e implementar o seu sistema



utilizando os resultados das simulações efetuadas. O conhecimento prévio dos materiais e das condições ideais para o fabrico desse mesmo sistema, bem como dos parâmetros adequados, permitirá não só poupar tempo como evitar o desperdício de materiais, e obter valores de geração máximos.

Numa primeira fase foi analisada a influência dos parâmetros geométricos do TEG, onde inicialmente foi avaliada a influência da espessura do TEG. Os valores utilizados para a o ensaio foram:

- $h_{te} = 1,1 \text{ mm}$  ;  $h_e = 0,4 \text{ mm}$  ;  $h_c = 1 \text{ mm}$  ; Espessura total = 2,5 mm
- $h_{te} = 4 \text{ mm}$  ;  $h_e = 0,5 \text{ mm}$  ;  $h_c = 1,5 \text{ mm}$  ; Espessura total = 6 mm

De seguida, foi feita uma análise do comportamento do TEG alterando o número de termopares. O número de termopares utilizados para o ensaio foi de 104, 170 e 240 termopares. Foram obtidos os valores da potência e da tensão de saída, relativamente à diferença de temperatura.

Na segunda fase da simulação, foi feita uma análise das propriedades termoelétricas, onde podemos observar a influência do tipo de componentes ativos e passivos na obtenção de energia por parte do TEG. Primeiro, foi feita uma análise da potência obtida pelo modelo utilizando diferentes materiais semicondutores. Os materiais utilizados foram  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  - a,  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  - b,  $\text{Mg}_2\text{Si}$  e  $\text{SiGe}$ .

Por fim, foi feita uma análise da influência dos elementos passivos, onde é simulada a influência das placas de cerâmica e dos elétrodos de ligação. Para as placas de cerâmica é feita uma análise do comportamento do TEG usando placas de cerâmica de silício ( $\text{SiC}$ ), óxido de alumínio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) e nitreto de alumínio ( $\text{AlN}$ ). Para análise da influência dos elétrodos, é feita uma análise do comportamento do TEG usando elétrodos de cobre ( $\text{Cu}$ ), alumínio ( $\text{Al}$ ) e níquel ( $\text{Ni}$ ).

### 5.3 Comentário conclusivo

Neste capítulo foi então apresentada e caracterizada toda a unidade experimental utilizada no estudo experimental, no âmbito do presente trabalho dissertativo. Neste contexto, numa primeira secção foi apresentado o simulador utilizado para o estudo experimental assim como uma pequena comparação com outros métodos semelhantes de simulação. De seguida, foram descritas as etapas realizadas no procedimento experimental, bem como todas as metodologias utilizadas neste estudo para a otimização do desempenho do sistema de captação de energia e, consequentemente, a obtenção dos melhores resultados na caracterização do conversor termoelétrico. De acordo com esta sequência, no capítulo seguinte, apresentar-se-ão todos os resultados obtidos experimentalmente neste estudo, procedendo-se à sua análise e discussão.

## Capítulo 6 – Análise e discussão de resultados

Neste capítulo faz-se a apresentação dos resultados com o objetivo principal de demonstrar o comportamento do módulo termoeétrico, através da variação dos parâmetros que influenciam o seu desempenho, nomeadamente a diferença das temperaturas entre a face fria e a face quente do módulo, mas também avaliar a influência dos elementos passivos e ativos de gerador termoeétrico.

Como já foi mencionado no capítulo anterior, as simulações foram feitas para avaliar a influência dos parâmetros geométricos e dos parâmetros termoeétricos, e após terem sido feitas as simulações no simulador criado em Matlab, os resultados foram agrupados em duas partes: resultados obtidos através da variação dos parâmetros geométricos e resultados obtidos através da variação das propriedades termoeétricas.

De modo a que as simulações realizadas no trabalho experimental fossem equiparáveis, os mesmos foram realizados sempre no mesmo computador e mesma versão do Matlab.

### 6.1 Análise dos resultados em função da variação dos parâmetros geométricos

Para poder analisar os resultados de acordo com a variação dos parâmetros geométricos, foi primeiramente analisada a influência da espessura do TEG, onde foram usados os seguintes valores de espessura:

- Espessura 1:  $h_{te} = 1,1 \text{ mm}$  ;  $h_e = 0,4 \text{ mm}$  ;  $h_c = 1 \text{ mm}$  ; Espessura total = 2,5 mm
- Espessura 2:  $h_{te} = 4 \text{ mm}$  ;  $h_e = 0,5 \text{ mm}$  ;  $h_c = 1,5 \text{ mm}$  ; Espessura total = 6 mm

Na Figura 31 podemos observar o comportamento dos TEGs de diferentes espessuras, onde é comparada a potência em função da diferença de temperatura.

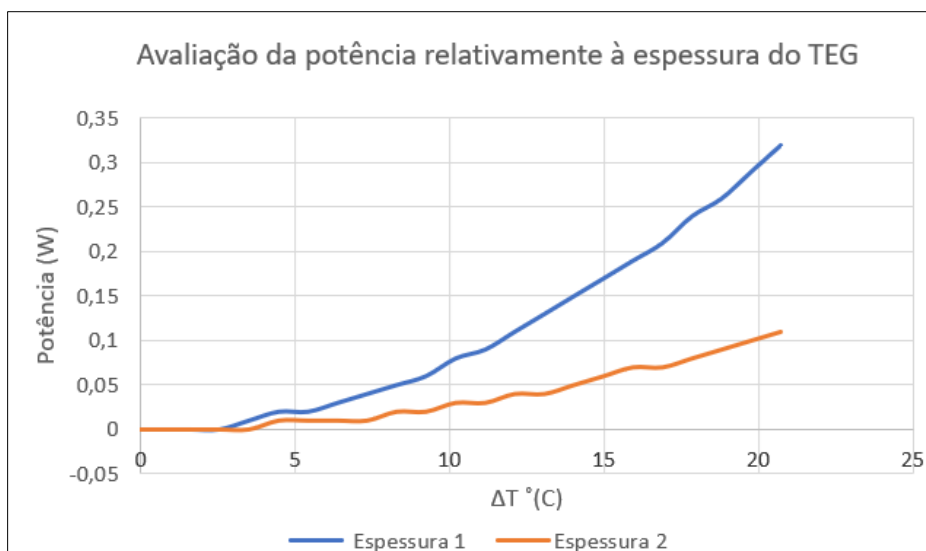


Figura 31 – Variação da potência em função da variação da diferença de temperatura, para diferentes espessuras do TEG

A Figura 31 permite-nos concluir que o TEG com menor espessura, 2,5 mm, consegue obter uma maior potência que o TEG com a espessura superior, 6 mm, diferença essa que se vai tornando maior com o aumento da diferença de temperatura.

De seguida foi feita uma análise do comportamento do TEG analisando a influência do número de termopares na potência e na tensão de circuito aberto em função da diferença de temperatura. Para o ensaio foram usados os seguintes valores de  $n$ :

TEG 1 – 104 termopares;

- TEG 2 – 170 termopares;
- TEG 3 – 240 termopares.

Os resultados obtidos podem ser observados na Figura 32.

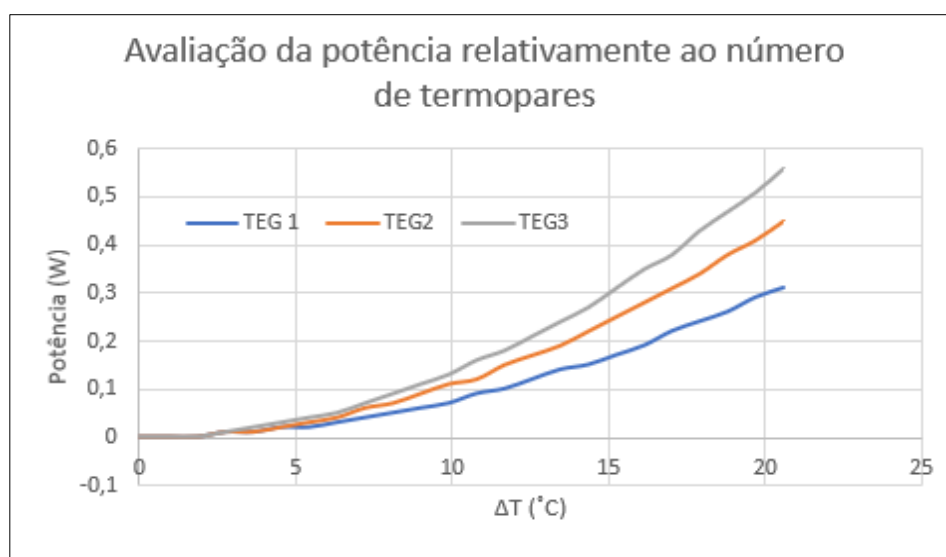


Figura 32 – Variação da potência em função da variação da diferença de temperatura, para diferentes números de termopares,  $n$ .

A Figura 32 está de acordo com os resultados esperados, pois quantos mais termopares o modelo incluir maior energia este vai produzir. No caso da análise do número de termopares, surge o problema da aplicabilidade e uso no dia a dia por parte do utilizador de forma cómoda. Apesar de os resultados comprovarem que um maior número de termopares produz uma maior potência, devemos ter em conta que o modelo deve ter as dimensões adequadas para ser facilmente aplicado em locais como o pulso, o peito ou a perna. Na Figura 33 observamos os valores da tensão em vazio em função da diferença de temperatura, para diferentes números de termopares, onde confirmamos que o melhor resultado é obtido pelo TEG 3 que tem o maior número de termopares.

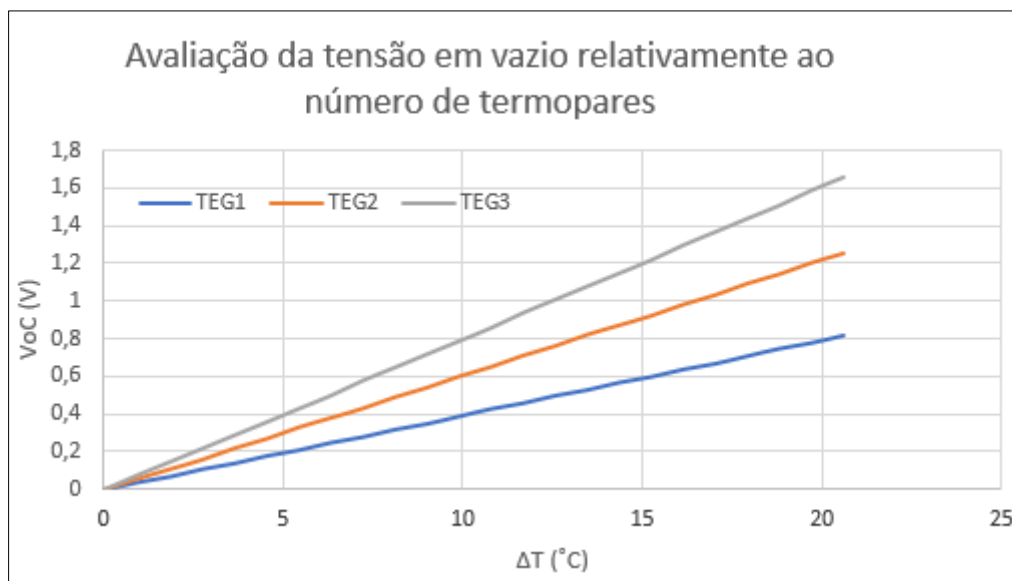


Figura 33 – Variação da tensão em vazio em função da variação da diferença de temperatura, para diferentes números de termopares,  $n$ .

## 6.2 Análise dos resultados em função da variação das propriedades termoelétricas

Para poder analisar os resultados de acordo com a variação das propriedades termoelétricas, foram, numa primeira instância, fixados os seguintes parâmetros:

- Número de termopares: 127
- Resistência de contacto:  $3,5 \times 10^{-6} (\Omega \text{ cm}^2)$

Primeiro, foi feita uma análise da potência obtida pelo módulo utilizando diversos materiais semicondutores. Com o simulador utilizado no estudo experimental, e tal como foi anteriormente indicado na subsecção 5.1.2, é possível seleccionar diferentes tipos de materiais termoelétricos e respetivos valores de coeficiente de Seebeck, condutividade térmica e condutividade elétrica.

Os materiais semicondutores utilizados foram:

- $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  - a;
- $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  - b;
- $\text{Mg}_2\text{Si}$ ;
- $\text{SiGe}$ .

O simulador permite escolher os semicondutores tipo-n e tipo-p, para facilitar a análise o material utilizado nos semicondutores tipo-p manteve-se constante,  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  - a, sendo apenas alterado o material semiconductor do tipo-n. Os valores da potência obtidos para cada um dos materiais semicondutores são mostrados na Figura 34.

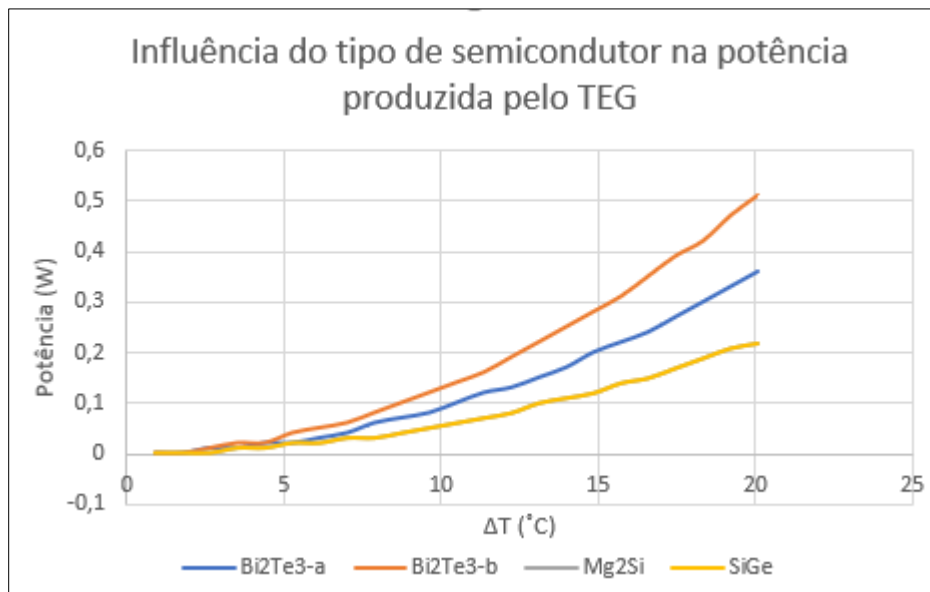


Figura 34 – Variação da potência em função da variação da diferença de temperatura, para diferentes materiais semicondutores.

Os resultados da Figura 34 comprovam que o melhor semiconductor de um TEG é composto por telureto de bismuto como tinha sido anteriormente discutido, mesmo que dentro dos semicondutores de telureto de bismuto possam existir diferenças mínimas entre eles. No gráfico da Figura 34 só é possível observar três características, isto porque os valores obtidos para o semiconductor  $\text{Mg}_2\text{Si}$  coincidem com os valores obtidos para o semiconductor  $\text{SiGe}$ , ficando sobrepostos na figura.

De seguida foi feita uma análise da influência do uso de placas de cerâmicas na potência obtida pelo TEG. Para a obtenção dos resultados foram usadas placas de cerâmica de silício ( $\text{SiC}$ ), óxido de alumínio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) e nitreto de alumínio ( $\text{AlN}$ ). Os resultados obtidos podem ser vistos na Figura 35.

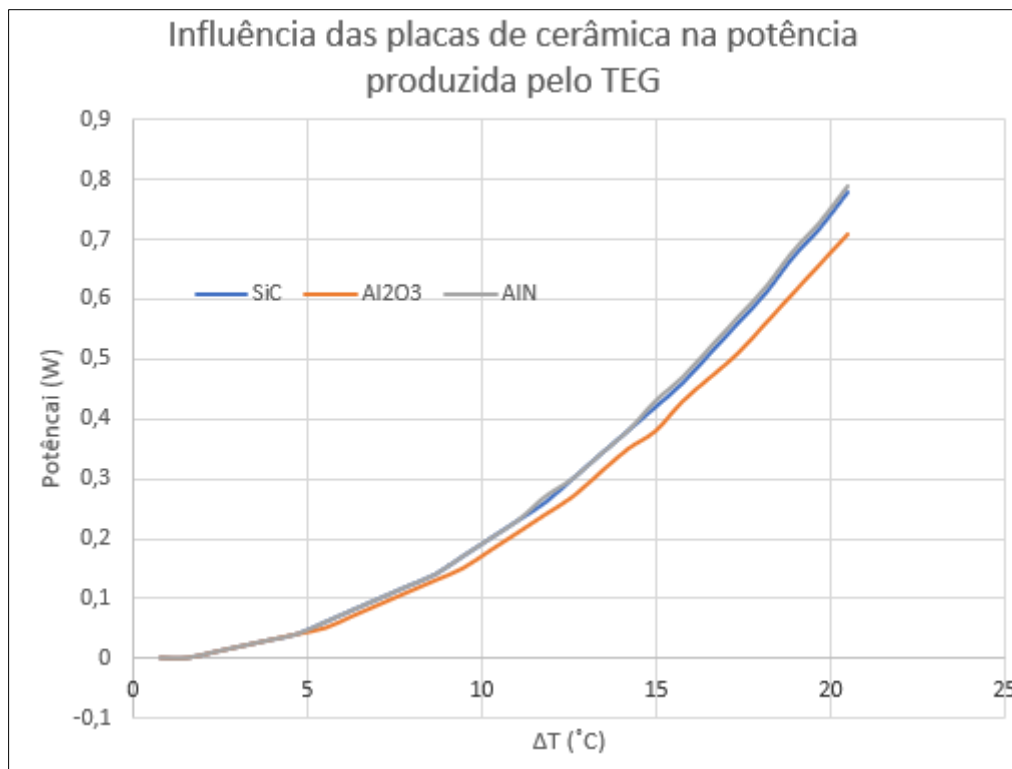


Figura 35 – Variação da potência em função da variação da diferença de temperatura, para diferentes materiais da placa de cerâmica utilizada.

Podemos observar na Figura 35 que o tipo de placas de cerâmica não tem grande influência na potência obtida pelo módulo. Ainda assim, com diferenças de temperatura superiores a 10 °C verificamos que as placas de cerâmica mais eficientes são as placas de SiC e Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, que apresentam comportamentos semelhantes e pouco superiores à placa de cerâmica de AlN.

Por fim, foi feita a análise da influência do tipo de elétrodos utilizados na potência obtida pelo TEG. Os elétrodos utilizados foram elétrodos de cobre (Cu), de alumínio (Al) e de níquel (Ni). Os resultados obtidos podem ser observados na Figura 36.

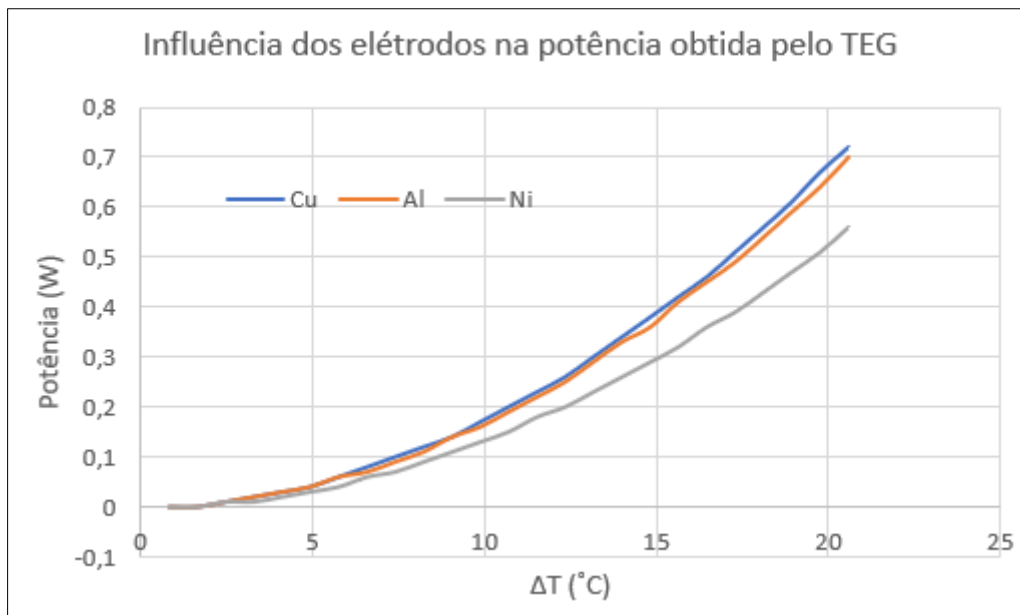


Figura 36 – Variação da potência em função da variação da diferença de temperatura, para diferentes tipos de elétrodos.

A Figura 36 demonstra que o uso de diferentes tipos de elétrodos não se reflete numa grande alteração na potência de saída do modelo. Ainda assim, podemos observar que se torna mais viável utilizar elétrodos de cobre e alumínio, sendo que, principalmente a partir do momento em que a diferença de temperatura ultrapassa os 15 °C, esses dois tipos de elétrodos apresentam melhores resultados que o elétrodo de níquel.

## Capítulo 7 – Conclusão

Nos dias de hoje, uma das grandes preocupações, tanto da sociedade como da indústria, é a procura incessante por fontes de energia renováveis que possam substituir os combustíveis fósseis que, para além de serem finitos, representam um grande perigo de poluição do planeta. De encontro com essa procura, recentemente, tem também existido um maior interesse em dispositivos eletrónicos e dispositivos wearable em geral, para monitorização de saúde, entre outras aplicações.

Os atuais métodos mais convencionais para alimentar dispositivos eletrónicos, o uso de pilha e de baterias, acabam por trazer cada vez mais desvantagens para o seu utilizador. Para além dos problemas ambientais associados a pilhas e baterias, estas não conseguem conferir um longo período de vida ao dispositivo eletrónico que alimentam, o que leva à necessidade da sua troca com alguma frequência. Este problema acaba por trazer algum desconforto para os utilizadores, uma vez que os dispositivos wearable monitorizam um parâmetro de saúde, sendo por isso conveniente que para uma boa medição o elemento de alimentação garanta uma carga suficiente.

Os sistemas que aproveitam o calor humano dissipado para produzir energia acabam por ser uma ótima alternativa para alimentar dispositivos eletrónicos, sendo que garantem um tempo de vida útil prolongado e, em certas situações, podemos ter um sistema onde um gerador de energia atua em complemento com uma bateria.

Uma das desvantagens destes sistemas incide na pouca energia que é recolhida por eles. Nesse contexto, o presente trabalho procura analisar e detetar todos os parâmetros que possam influenciar o desempenho de um TEG para que, no futuro, perante o desenvolvimento de um módulo termoelétrico, possam já ser conhecidos os parâmetros ideais para a produção de energia.

As simulações realizadas no estudo experimental, assim como todo o estudo feito ao longo da dissertação, vêm comprovar que a análise de todos os parâmetros associados à produção de energia por um TEG são relevantes para o seu desempenho, desde o seu local de aplicação, até às condições de temperatura ambiente ideais para o utilizar, bem como os elementos que o compõem.

Podemos concluir que uma maior diferença de temperatura entre as faces fria e quente do TEG, a aplicação deste junto à artéria radial ou artéria ulnar, e a sua utilização a caminhar (alta taxa metabólica), são alguns dos fatores que contribuem para um melhor desempenho dos módulos termoelétricos.

Concluimos também, relativamente à estrutura do TEG, que este apresenta um melhor desempenho quando a sua espessura é de aproximadamente de 4 mm, quando o material semicondutor utilizado é o telureto de bismuto e o número de termopares é elevado.

Os ensaios experimentais permitiram reforçar a importância de não negligenciar qualquer parâmetro ou componente do TEG, o que acaba sempre por se refletir nos parâmetros de saída do módulo. Para além do mais, os resultados obtidos vão de encontro com os objetivos da dissertação que passam pelo estudo dos parâmetros de otimização do módulo termoelétrico



## **7.1 Perspetivas futuras**

Infelizmente devido à atual situação de pandemia foi impossível realizar os testes experimentais fisicamente, o que acabou por não nos permitir analisar a influência do local de aplicação, nem das condições do meio ambiente como o vento, a humidade ou o suor. Por esse motivo, o trabalho futuro passaria em primeiro lugar por comprovar fisicamente a eficiência dos resultados obtidos nas simulações. Ainda, seria importante analisar os parâmetros que não nos foram possíveis analisar com o simulador, comprovando os conceitos teóricos abordados também na presente dissertação.

# Referências bibliográficas

- [1] - Calado, M. R. A.. MATERIAIS E PROPRIEDADES ELECTROMAGNÉTICAS (Capítulo I). Universidade da Beira Interior, 2001/2002.
- [2] - Martins, J., Motores de Combustão Interna, 4th edition (revised and extended, in Portuguese). Publindústria, Porto, Portugal, ISBN: 978-989-723-033-2, 2013.
- [3] - Imagem editada pelo autor de <https://pt.dreamstime.com/foto-de-stock-royalty-free-m%C3%B3dulo-termoel%C3%A9trico-image40679495>.
- [4] - da Cruz, A. P. V.. Simulação térmica e elétrica dos módulos termoelétricos e a sua respetiva otimização. Dissertação de Mestrado. Universidade do Minho, 2014.
- [5] - J. S. and H. J. G. G.S. Nolas. Thermoelectrics: Basic Principles and New Materials Development. Berlin, 2001.
- [6] - Pourkiaei, S. M., Ahmadi, M. H., Sadeghzadeh, M., Moosavi, S., Pourfayaz, F., Chen, L., ... Kumar, R.. Thermoelectric cooler and thermoelectric generator devices: a review of present and potential applications, modeling and materials. *Energy*. 2019. doi:10.1016/j.energy.2019.07.179.
- [7] - Tsai, H.-L., & Lin, J.-M.. Model Building and Simulation of Thermoelectric Module Using Matlab/Simulink. *Journal of Electronic Materials*. 39(9), 2105–2111, 2009. doi:10.1007/s11664-009-0994-x.
- [8] - Baek D, Chang N, Kim J, Lin S, Park SH, Wang Y, et al. Dynamic reconfiguration of thermoelectric generators for vehicle radiators energy harvesting under location-dependent temperature variations. *IEEE Trans Very Large Scale Integr Syst*. 26 (7), pp. 1241- 1253, 2018. <https://doi.org/10.1109/tvlsi.2018.2812705>.
- [9] - Li X, Xie C, Quan S, Huang L, Fang W. Energy management strategy of thermoelectric generation for localized air conditioners in commercial vehicles based on 48 V electrical system. *Appl Energy*. 231, pp. 887-900, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.09.162>.
- [10] - Figura de Adcol Electronic (Guangzhou) Ltd. Consultado em <http://portuguese.peltier-thermoelectriccooler.com/supplier-213266-multi-stage-peltier-cooler>.
- [11] - H. Julian Goldsmith. Introduction to thermoelectricity. Springer, 2010.
- [12] - Direct Conversion of Heat Energy to Electrical Energy, [Online]. Available: <http://www.mpoweruk.com/thermoelectricity.htm>. [Acedido em 24 08 2014].
- [13] - Gonçalves, L.M.V.. Microsistema Termoelétrico baseado em teluretos de bismuto e antimónio. Tese de Doutoramento. Universidade do Minho, 2008.
- [14] - Winjgaards, D.. Lateral on-chip integrated peltier elements based on polycrystalline silicon-germanium. Doctoral Thesis. TU Delft, 2003.
- [15] - Audiffred, D. B.. Utilização de dispositivos termoelétricos para geração de energia elétrica em nanosatélites. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina, 2015.

- [16] - Souza, D.H.C.. Otimização do uso de refrigeradores termoelétricos em processos de refrigeração. Dissertação de Mestrado. Universidade de Brasília, 2007.
- [17] - Bahk, J.-H., Fang, H., Yazawa, K., & Shakouri, A. Flexible thermoelectric materials and device optimization for wearable energy harvesting. *Journal of Materials Chemistry C* 3(40), pp. 10362–10374, 2015. doi:10.1039/c5tc01644d
- [18] - Bulman G, Barletta P, Lewis J, Baldasaro N, Manno M, Bar-Cohen A, Yang B.. Superlattice-based thin-film thermoelectric modules with high cooling fluxes. *Nature Communications*. 7: 10302, 2016.
- [19] - Cheng Y-H, Lin W-K.. Geometric optimization of thermoelectric coolers in a confined volume using genetic algorithms. *Appl Therm Eng.*25, pp. 298-2997, 2005. <https://doi.org/10.1016/J.APPLTHERMALENG.2005.03.007>.
- [20] - Saifizi M, Zakaria MS, Yaacob S, Wan K.. Development and analysis of hybrid thermoelectric refrigerator systems. *IOP Conf Ser Mater Sci Eng.* 318 (1), 2018. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/318/1/012036>.
- [21] - Gould CA, Shammas NYA, Grainger S, Taylor I.. Thermoelectric cooling of microelectronic circuits and waste heat electrical power generation in a desktop personal computer. *Mater Sci Eng B Solid-State Mater Adv Technol.* 176(4), pp. 316-325, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.mseb.2010.09.010>.
- [22] - Chowdhury I, Prasher R, Lofgreen K, Chrysler G, Narasimhan S, Mahajan R, Koester D, Alley R, Venkatasubramanian R.. On-chip cooling by superlattice-based thin-film thermoelectrics. *Nature Nanotechnology*. 4(4), pp. 235–238, 2009.
- [23] - Hsiao YY, Chang WC, Chen SL.. A mathematic model of thermoelectric module with applications on waste heat recovery from automobile engine. *Energy*. 35 (3), pp. 1447-1454, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2009.11.030>.
- [24] - M. Kishi et al.. Micro thermoelectric modules and their application to wristwatches as an energy source. In *Proc. IEEE 18th Int. Conf. Thermoelect. (ICT)*. , pp. 301–307, Aug. /Sep. 1999.
- [25] - H. Bottner et al.. New high density micro structured thermogenerators for stand alone sensor systems. In *Proc. IEEE 26th Int. Conf. Thermoelect. (ICT)*, pp. 306–309, jun. 2007.
- [26] - V. Leonov, in *Wearable Monitoring Systems*, edited by D. D. Rossi (Springer, New York, 2010), Chap. 2, pp. 27-49.
- [27] - T. Torfs, V. Leonov, and R. J. M. Vullers. Pulse oximeter fully powered by human body heat. *Sens. Transducers J.* 80, pp. 1230-1238, 2007.
- [28] - Van Bavel M, Leonov V, Yazicioglu RF et al.. Wearable battery-free wireless 2-channel EEG systems powered by energy scavengers. *Sens Transducers J.* 94, pp. 103–115, 2008. [http://www.sensorsportal.com/HTML/DIGEST/P\\_300.htm](http://www.sensorsportal.com/HTML/DIGEST/P_300.htm)
- [29] - Siddique, A. R.. Micro Power Harvesting using Flexible Thermoelectric and Electromagnetic Vibration-based Power Generators. Master Dissertation. University of Guelph, 2016.

- [30] - Hardy JD, Gagge AP, Stolwijk JAJ (eds). Physiological and behavioral temperature regulation. Charles C Thomas Publisher, Springfield, 1970.
- [31] - Itoh S, Ogata K, Yoshimura H (eds). Advances in climatic physiology. Igaku Shoin Ltd., Tokyo; Springer-Verlag, Berlin, 1972.
- [32] - Monteith J, Mount L (eds). Heat loss from animals and man. Butterworths, London, 1974.
- [33] - Leonov, V.. Thermoelectric Energy Harvesting of Human Body Heat for Wearable Sensors. *IEEE Sensors Journal*. 13(6), pp. 2284–2291, 2013. doi:10.1109/jsen.2013.2252526]
- [34] - Wong, H.-P., & Dahari, Z. Human body parts heat energy harvesting using thermoelectric module. In *2015 IEEE Conference on Energy Conversion (CENCON)*, 2015. doi:10.1109/cencon.2015.7409541.
- [35] - Chandrakasan, A. P., Verma, N., & Daly, D. C.. Ultralow-Power Electronics for Biomedical Applications. *Annual Review of Biomedical Engineering*. 10(1), pp. 247–274, 2008. doi:10.1146/annurev.bioeng.10.061807.160547.
- [36] - Ferrario, A., Boldrini, S., Miozzo, A., & Fabrizio, M. Temperature dependent iterative model of thermoelectric generator including thermal losses in passive elements. *Applied Thermal Engineering*. 150 (5), pp. 620-627, 2019. doi:10.1016/j.applthermaleng.2019.01.031
- [37] - M. Gomez, R. Reid, B. Ohara, H. Lee. Influence of electrical current variance and thermal resistances on optimum working conditions and geometry for thermoelectric energy harvesting. *J. Appl. Phys.* 113, 174908, pp. 1-8, 2013.
- [38] - E.E. Antonova, D.C. Looman. Finite elements for thermoelectric device analysis in ANSYS. In *ICT 2005. 24th International Conference on Thermoelectrics*. pp. 215–218, 2005.
- [39] - M. Jaegle. Simulating thermoelectric effects with finite element analysis using COMSOL. In *Proceedings ECT*, Odessa, 2007.
- [40] - S. Rustemli, F. Dincer. Modeling of photovoltaic panel and examining effects of temperature in matlab/simulink. *Electron. Electrical Eng.* 109, pp. 35–40, 2011.
- [41] - H.-L. Tsai, J.-M. Lin. Model building and simulation of thermoelectric module using matlab/simulink. *J. Electron. Mater.* 39, pp. 2105–2111, 2010.
- [42] - A. Kane, V. Verma, B. Singh. Temperature dependent analysis of thermoelectric module using Matlab/SIMULINK. In *2012 IEEE International Conference on Power and Energy (PECon)*. pp. 632–637, 2012.